

Diplomová práce

**Návrh vodního chlazení bateriového boxu**

Design of liquid cooling of the battery box

Jméno autora: Bc. Matěj Šústek

Rok odevzdání: 2021

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Matěj Šústek**

Studijní program:

N0715A270004 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma:

Návrh kapalinového chlazení bateriového boxu  
Design of liquid cooling of the battery box

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí současného stavu.
2. Teoretický základ sdílení tepla.
3. Výpočet výměníku tepla pro zadaný okruh chlazení.
4. Konstrukční návrh chlazení bateriového boxu.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HEJZLAR, Radko. Sdílení tepla. Vyd. 4. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02974-3.
- [2] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. Praha: Scientia, 1996. ISBN 80-7183-008-9.
- [3] NOŽIČKA, Jiří. Mechanika tekutin. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02865-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Buráň**

Datum zadání: 30.11.2020

Datum odevzdání: 23.04.2021

---

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
*děkanka fakulty*

## **Poděkování**

Děkuji panu Ing. Michalu Buráňovi za jeho vstřícný přístup, odbornou pomoc a správné připomínky k problematice mé diplomové práce.

## **Abstrakt**

V této diplomové práci je popsána problematika současného stavu v odvětví elektromobility, která popisuje výběr bateriových článků a jednotlivé druhy chlazení v automobilech. Pro samotnou konstrukci je rozebrána teorie sdílení tepla a výběr vhodného výměníku pro konstrukční návrh. V praktické části diplomové práce jsou provedeny simulace na zjednodušených modulech s prvky vodního chlazení, přičemž nejlepší z nich jsou použity pro konfiguraci bateriového boxu vozidla Titan. V závěru práce je proveden fyzický experiment na zkušebním modulu, který byl vyroben dle návrhu. Tento experiment obsahuje prvky vyrobené moderními technologiemi v odvětví automobilového průmyslu.

## **Klíčová slova**

Bateriové články, vzduchové chlazení, kapalinové chlazení, bateriový box, výměník tepla, konstrukční návrh, CNC obrábění, 3D tisk

## **Abstract**

This thesis discusses the current state of electromobility, choice of battery cells, and types of cooling systems. A heat sharing theory and the choice of exchanger plan are described for the purposes of the construction plan. In the partical part of the thesis, simulations on simplified modules with water cooling elements are carried out and subsequently, the best of them are used for the Titan vehicle battery box configuration. In the final part of the thesis, a physical experiment based on the technical drawings is carried out. This experiment includes elements of modern technology used in the automotive industry.

## **Key words**

Battery cells, air cooling, liquid cooling, battery box, radiator, construction, CNC machining, 3D print

# Obsah

<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b> .....	<b>7</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Vlastnosti bateriových článků a problematika elektromobilů</b> .....	<b>9</b>
1.1 Bateriové články vhodná pro elektrická vozidla.....	9
1.2 Baterie lithium-iontová .....	10
1.3 Srovnání bateriových článků .....	11
1.4 Degradace baterií .....	12
<b>2 Shrnutí současného stavu chlazení elektrických vozidel</b> .....	<b>14</b>
2.1 Pasivní chlazení vzduchem .....	15
2.2 Aktivní chlazení vzduchem .....	16
2.3 Pasivní kapalinové chlazení .....	17
2.4 Aktivní kapalinové chlazení .....	18
2.5 Chlazení přímou expanzí .....	20
2.6 „PCM“ chlazení – chlazení změnou fáze .....	20
2.7 Srovnání vzduchového a kapalinového chlazení .....	21
<b>3 Teoretický základ sdílení tepla</b> .....	<b>24</b>
3.1 Přenos tepla vedením (kondukcí).....	24
3.2 Přenos tepla prouděním (konvekcí) .....	25
3.3 Přenos tepla zářením (sáláním).....	26
3.4 Tepelné vlastnosti materiálu .....	27
<b>4 Výpočet výměníku tepla</b> .....	<b>30</b>
4.1 Deskové výměníky .....	30
4.2 Výběr chladícího média .....	31
4.3 Rovnice tepelné bilance .....	34
4.4 Rovnice prostupu tepla .....	35

<b>5</b>	<b>Konstrukční návrh kapalinového chlazení bateriového boxu .....</b>	<b>37</b>
5.1	Návrh s tvarovaným plechem (1. varianta).....	37
5.2	Návrh s chladicí deskou (2. varianta) .....	40
5.2.1	Modifikace se závitovými pouzdry .....	43
5.3	Srovnání vybraných variant .....	44
5.3.1	1. varianta.....	45
5.3.2	2. varianta.....	49
<b>6</b>	<b>Experimentální část.....</b>	<b>53</b>
6.1	Vyhodnocení .....	55
<b>7</b>	<b>Závěrečné zhodnocení.....</b>	<b>59</b>
	<b>Závěr .....</b>	<b>60</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>61</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>65</b>
	<b>Příloha výkresové dokumentace.....</b>	<b>66</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$Q_t$	[J]	velikost tepelného toku
$\lambda$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
$d$	[m]	tloušťka desky
$S$	$[m^2]$	plocha desky
$\Delta T$	[K]	rozdíl teplot
$\alpha$	$[W \cdot m^2 \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
$Pr$	[W]	výkon vyzařujícího tělesa
$\varepsilon$	[/]	emisivita
$C$	$[J \cdot K^{-1}]$	tepelná kapacita
$c$	$[J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
$m$	[kg]	hmotnost
$P$	[W]	ztrátový výkon
$R$	$[\Omega]$	elektrický odpor
$I$	[A]	elektrický proud
$U$	[V]	elektrické napětí

## Úvod

Zdrojem elektrické energie v automobilech na elektrický pohon jsou výhradně bateriové články. Jelikož prochází bateriovým článkem elektrický proud, vzniká zde ztrátové teplo, které je potřeba odvádět. V teoretické části je proto popsána problematika sdílení tepla, která rozebírá sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním.

Cílem této diplomové práce je navrhnout chladicí systém pro elektromobil, na jehož vývoji se podíleli zaměstnanci a studenti ze studijního programu materiálů a technologií pro automobilový průmysl (dále vozidlo Titan).

K tomu je potřeba zhodnotit problematiku spojenou s vozidly na elektrický pohon a uvést jejich výhody a nevýhody. Dalším cílem je zhodnotit současný trend v odvětví chlazení a popsat aktuálně používané technologie na základě vědeckých studií.

V praktické části je proveden návrh dvou chladicích systémů na zjednodušených modulech, které jsou následně podrobeny simulační analýze. Výsledkem analýzy je volba optimálního konstrukčního řešení, které dokáže bateriové články udržet v bezpečném teplotním intervalu (0 – 40 °C). Dále byl navržen chladicí okruh, kde bylo zapotřebí zvolit vhodný výměník tepla, čerpadlo a zbytek chladicího okruhu.

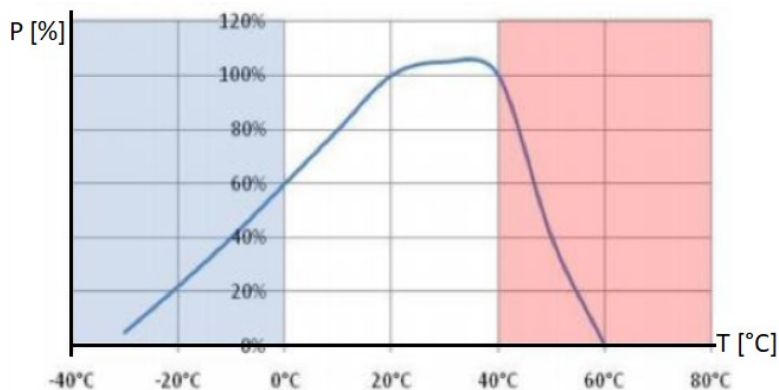
Závěr praktické části je zaměřen na fyzický experiment, který vychází z návrhu zjednodušeného modulu a jeho výkresové dokumentace. Při návrhu bude kladen důraz na dostupné technologie, volbu materiálu a poznatky z oblasti sdílení tepla.

Konstrukční návrh se realizoval v programu SolidWorks, což je 3D CAD software, ve kterém byly navrženy jednotlivé díly, technické výkresy a požadované simulace.



# 1 Vlastnosti bateriových článků a problematika elektromobilů

Základní komponent, který zabírá největší část bateriového boxu, jsou bateriové články, které dodávají elektrickou energii důležitou k pohonu elektromotoru. Také zde můžeme potenciálně hledat ztrátové teplo. Bateriové články samozřejmě musíme udržovat v rovnováze (0-40 °C), a to v různých podmínkách (viz **Obrázek 1**). [2]



*Obrázek 1 Závislost výkonu na teplotě u bateriových článků*

Za hlavní důvod, který brání většímu rozvoji elektromobility a akumulátorového napájení silničních vozidel, je považována nedostatečná energetická kapacita nebo přesněji měrná hmotnost či objemová kapacita elektrochemických akumulátorů elektrické energie. Zatímco měrná hmotnostní energetická kapacita benzínu je přibližně 2300 W·h/kg a nafty až 3300 W·h/kg, je měrná kapacita elektrochemických akumulátorů elektrické energie dvacetkrát až třicetkrát menší. V současné době dosahují špičkové lithium-polymerové akumulátory měrnou energetickou hmotnostní kapacitu až 200 W·h/kg, což je hodnota 5x vyšší než u olověných akumulátorů. Výrazného zlepšení dosáhly i lithiové akumulátory. [2]

## 1.1 Bateriové články vhodná pro elektrická vozidla

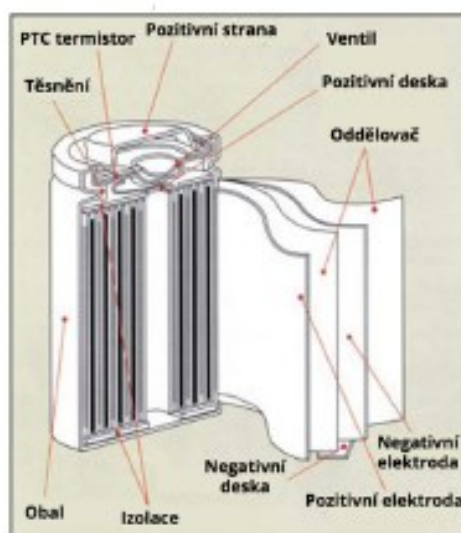
Bateriové články lze rozdělit podle různých kritérií, avšak u elektrických vozidel je důležité, aby měly schopnost opakovatelného dobíjení. Jedná se tedy o sekundární (trakční) bateriové články a pro tuto práci byly vybrány lithium-iontové, jelikož splňují požadavky použití u elektrických vozidel (viz **Tabulka 1**). [3]

Tabulka 1 Požadavky bateriových článků pro EV, převzato [3]

Požadavky EV
Počet cyklů
Rychlé nabíjení
Hustota energie
Ekologie
Nízká hmotnost
Vysoká kapacita

## 1.2 Baterie lithium-iontová

Katoda těchto baterií se skládá z  $Li_2MnO_2$  nebo  $LiNiO_2$ . Anoda je z matrice, která je uhlíková. Tato matrice se připravuje z grafitisovaných částí koksu. Elektrolyt tvoří vodíková sůl a rozpouštědlo. [3]



Obrázek 2 Cylindrický lithium-iontový článek, převzato [3]

Při nabíjení se ionty lithia ukládají do mřížek katody uhlíku. Při vybíjení jsou uvolňovány. Ionty kmitají mezi anodou a katodou (kmitavá baterie). Základní chemická reakce má tvar:  $Li_{\frac{1}{2}}CoO_2 + Li_{\frac{1}{6}}C_6 \leftrightarrow C_6 + LiCoO_2$ . [3]

Tabulka 2 Výhody a nevýhody lithiových článků, převzato [3]

Výhody	Nevýhody
Vysoká kapacita Nízká hmotnost Nízká hodnota samovybíjení Počet nabíjecích cyklů Vysoká hustota energie	Cena Doba nabíjení Absence dodávat vysoké proudy

### 1.3 Srovnání bateriových článků

Bateriové články jsou nejprve umístěny do tzv. modulů, kde jsou zapojeny sériově, paralelně nebo sérioparalelně do výsledné baterie. Geometrie bateriových článků určuje výsledný tvar modulu, který je nutno vhodnou konstrukcí a metodou chladit.

V automobilovém průmyslu jsou používány dva geometrické tvary bateriových článků. Jedná se o cylindrické a prizmatické bateriové články. V současné době je cylindrický tvar považován za nejpoužívanější. Ve světě elektromobilů je to dáno automobilkou značky Tesla, která používá třídu 18650. Cylindrický tvar bývá spojován s mezerami mezi jednotlivými články, které vznikají při tvorbě bateriového modulu. Tento jev bývá využit vhodným chladicím prvkem (například vlnovec, tubus). [7]

Prizmatické články našly uplatnění koncem minulého století, když se začaly objevovat ve spotřební elektronice, pro kterou byly vyvinuty. Tenký profil vykazuje řadu výhod jako například plošné řazení s chladicí mezerou nebo nenáročnost konstrukce chladicích prvků vlivem rovnoměrného tvaru. Potenciál těchto článků potvrzuje spolupráce Toyoty a Panasonic. [7]

Mezi nejdůležitější parametry bateriových článků patří kapacita článků, jmenovité napětí, vybíjecí proud a energetická kapacita článku. Ovšem tyto parametry přímo ovlivňuje objem, který je definovaný pro bateriové články. Dalším důležitým parametrem je cena a možnost dodání v daném množství. Tyto parametry jsou zapsány (viz **Tabulka 3**). [7]

*Tabulka 3 Srovnání bateriových článků*

Bateriový článek	Počet kusů	Kapacita článků [mA·h]	Jmenovité napětí [V]	Vybíjecí proud [A]	Energetická kapacita [kW/h]
LG	1862	3445	3,63	5	23,28
Enerdel	198	17500	3,6	54	12,47
Sony	1862	3120	3,6	10	20,91
EVC	1862	2100	3,6	5	14,08
Panasonic	1862	3350	3,6	10	23,82
Samsung	1343	4000	3,6	35	19,34
EHAO	1459	5000	3,7	10	26,99

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že nejvhodnější velikostí jsou standardní bateriové články konstrukce 18650. Volba tedy byla eliminována na tento typ konstrukce. Vzhledem

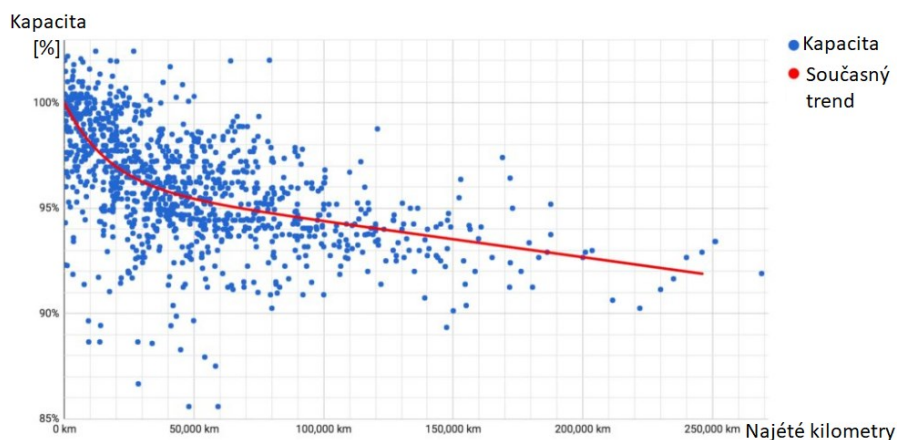
k obstojným parametrům, dobré ceně a možnosti dodání ve velkém množství, byly vybrány bateriové články LG M36 T (viz **Obrázek 3**). [7]



*Obrázek 3 Lithiový článek LG M36 T, převzato [7]*

#### 1.4 Degradace baterií

V současné době bateriové články s kombinací monitorovacích systémů začínají splňovat vlastnosti pro dlouhodobé využití. Životnost baterií v automobilovém průmyslu je podmíněna zárukou několika let, avšak existuje mnoho faktorů, které životnost zkracují. Mezi rizikové faktory patří: provozní teplota bateriových článků, rychlost vybíjení, rychlost nabíjení a cyklování (dobíjení z nízkého stavu do 100% nabití). Degradace baterie je ekvivalentem poměru stávající kapacity a kapacity původní, která se udává v procentech. Hranice konce životnosti se pohybuje mezi 70-80 %. Obecně můžeme říct, že pro baterie je ideální udržovat stav nabití mezi 20-80 % kapacity při teplotě 15–30 °C. Dále je důležité, aby bylo zabráněno promrzávání a přehřívání baterie.



*Obrázek 4 Degradace baterií vozidel Tesla S a Tesla X, převzato [10]*

Degradace bateriových článků je aktuální a velmi důležité téma v oblasti elektromobilů, jelikož je důležité, aby baterie měly dostatečnou životnost. Majitelé vozů Tesla (Model S a Model X) pravidelně sdílí průměrnou spotřebu energie společně s kapacitou. Výzkum zjistil, že degradace baterie probíhá nejrychleji za prvních 50000 km (5 %). Pak zpomalí a ustálí se na 1 % za 50000 km, což je přijatelný výsledek (viz **Obrázek 4**). [10]

*Tabulka 4 Legenda názvů chlazení*

	<b>Typ chlazení</b>
PC1	Pasivní chlazení vzduchem
AC1	Aktivní chlazení vzduchem
AC2	Aktivní chlazení kapalinou
AC3	Aktivní chlazení přímou expanzí

*Tabulka 5 Hodnocení degradace, převzato [11]*

<b>Hodnocení</b>	<b>Degradace [%]</b>
Výborné	<4
Dobré	4-5
Špatné	5-6
Velmi špatné	>6

Zpracování dat bylo provedeno na základě informací z vládní laboratoře, kde bylo možné získat informace o degradaci bateriových článků. Interval najetých kilometrů byl přibližně 35000-70000 km, což není ideální, avšak k určení orientační míry degradace baterie dostatečné. Ze zjištěných výsledků (viz **Tabulka 6**) je zřejmé, že vzduchové chlazení není vhodné pro elektrická vozidla z hlediska degradace bateriových článků. Naopak nejlepší výsledky vykazuje aktivní kapalinové chlazení, kde míra degradace nepřekračuje 5,3 %. [10], [11]

*Tabulka 6 Degradace bateriových článků u jednotlivých vozidel, převzato [11]*

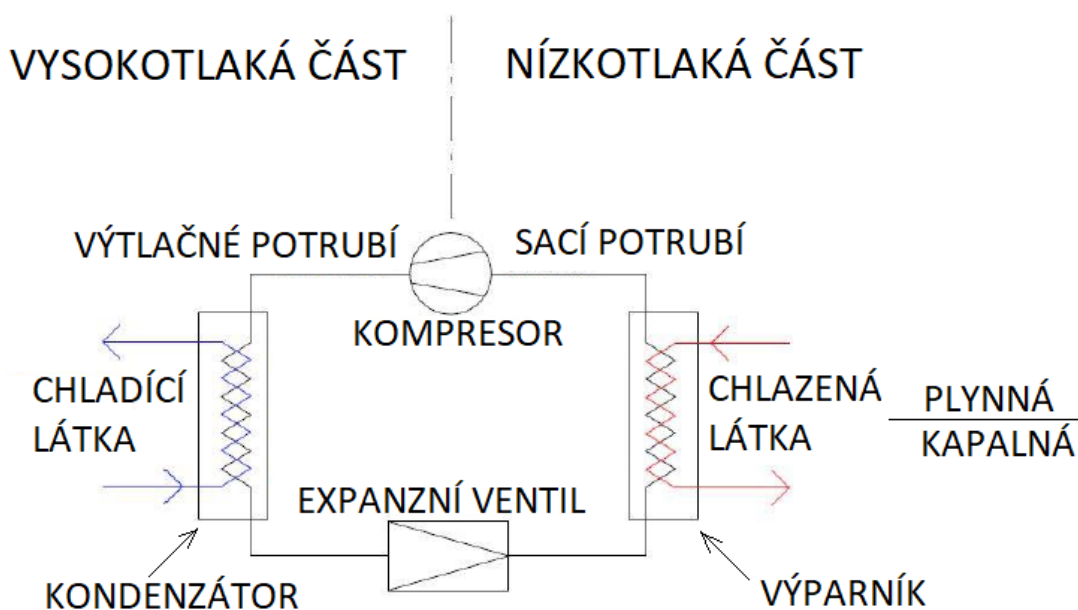
<b>Automobil</b>	<b>Bateriový článek</b>	<b>Původní kapacita [A·h]</b>	<b>Druh chlazení</b>	<b>Degradace baterie [%]</b>
BMW i3	Li-ion	60	AC3	4,1
Chevrolet Spark	Li-ion	52	AC2	3,6
Ford Focus	Li-ion	75	AC2	5,3
Mercedes Třída B	Li-ion	93	AC2	3,4
Mitsubishi iMiev	Li-ion	50	AC1	7,4
Nissan Leaf	Li-ion	66,2	PC1	6,1
Smart Electric	Li-ion	52	AC2	3,8
Tesla S, X	Li-ion	-	AC2	1

## 2 Shrnutí současného stavu chlazení elektrických vozidel

V dnešní době využívá elektrického pohonu široká škála automobilek a jejich chladicí systémy se mohou lišit. Chladicí systémy se dají rozdělit podle různých kritérií, avšak nejčastěji se používá rozdělení na aktivní a pasivní chlazení, posléze rozdělení podle typu chladicího média. Chladicí médium může být v přímém kontaktu (suchý vzduch, olej) nebo v nepřímém kontaktu (voda, etylenglykol, náplň klimatizace). [20], [21]

Je tedy zřejmé, že chladicí zařízení jsou nepostradatelnou součástí vozidel na elektrický pohon. Chladicí zařízení je uzavřený, v ideálním případě hermeticky těsněný potrubní systém, ve kterém obíhá chladicí médium. Jedná se o provozní látku, která při nízké teplotě a tlaku teplo přijímá a při vyšší teplotě a vyšším tlaku teplo vydává. [20], [21]

Elektrická vozidla využívající kapalně chladicí systémy používají tzv. kompresorové chladicí okruhy, které se skládají z vysokotlaké části a nízkotlaké. Kompresor a expanzní ventil tvoří jakési rozhraní mezi těmito tlakovými úrovněmi.



Obrázek 5 Kompresorový chladicí okruh, převzato [21]

**Kompresor** je vybaven nejčastěji elektromotorem a jeho úkolem je stlačování páry, která má nízký výparný tlak na tlak vyšší kondenzační. Dalším úkolem je doprava pracovní látky od výparníku ke kondenzátoru, kde zvyšuje entalpii kvůli vzniklé práci, která byla přivedena od kompresoru.

**Expanzní ventil** má za úkol vstříknout do výparníku tolik tekutého chladiva, aby se v jeho trubkách mohlo co nejvíce chladiva vypařit. Chladivo potřebuje k vypaření mnoho energie, která je odebírána chlazenému médiu.

**Výparník** je důležitou součástí chladivového systému. Chladivo se při nízkém tlaku (sací tlak) dostává většinou v kapalném stavu do výparníku, kde se při absorpci tepla, které v ideálním případě kompletně pochází z ochlazované látky, vypaří. U všech uvedených možností je tok tepla stejný. Probíhá z teplého ke studenému prostředí.

**Kondenzátor** může být stejně jako výparník lamelový, chlazený kapalinou nebo může své teplo předávat pevné látce. Jedná se o výměník tepla, kde při procesu chlazení odebírá teplo stlačeným parám chladiva. Tímto způsobem dochází k jeho kondenzaci. Kondenzační teplo se odvádí do vzduchu nebo do vody či jiné látky.

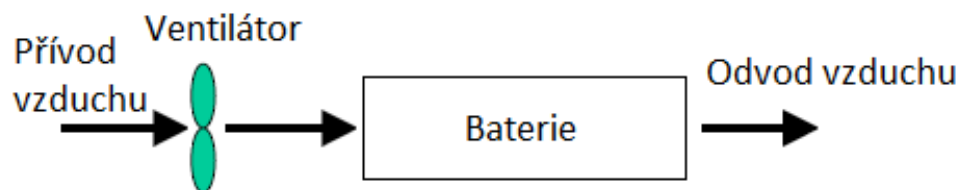
## 2.1 Pasivní chlazení vzduchem

Pasivní chlazení vzduchem je ekvivalentem pro nejjednodušší formu chlazení v elektromobilech. Nejčastěji používaným chladícím médiem je vzduch. Vzduch je přiváděn z okolí nebo kabiny elektromobilu. Vzduch, jakožto chladící médium je ohříván nebo chlazen klimatizací, přesto je tato konstrukce považována za pasivní systém. [15], [16]

Tento typ chlazení bývá rozdělován do dalších dvou podkategorií na chlazení sériové a paralelní. Jestliže vzduch není rozdělen při protékání baterií a chladí baterii jako celek, jedná se o sériové chlazení. Pokud je proud vzduchu rozdělen a chladí jednotlivé bateriové moduly zvlášť, jedná se o paralelní chlazení vzduchem. Paralelní typ chlazení má výhodu v tom, že dokáže vytvořit rovnoměrnost v systému chlazení. [15], [16]

Další funkcí pasivního chlazení je ventilace chlazených baterií, kde je možný únik nebezpečných výparů bateriových článků. Mezi největší výhody pasivního chlazení vzduchem patří jednoduchost provedení, nízká cena, snadná servisní údržba a spolehlivost systému. Nevýhodou je však hlučnost, která je způsobená ventilátory, nízká účinnost, nerovnoměrnost chlazení, kterou lze eliminovat paralelní způsobem chlazení. [15], [16]

Tento druh chlazení není příliš vhodný pro vozidla na elektrický pohon, jelikož vzduch přiváděný z kabiny může zapříčinit, že se baterie budou přehřívat (teplota v kabině může být vyšší než v okolí). Z toho důvodu je využití pasivního chlazení vzduchem soustředěno do odvětví hybridních vozidel, kde z baterie nejsou odebírány vysoké proudy. Hybridní vozidla nevyžadují vysoce výkonný BTMS jako moderní elektrická vozidla. [15], [16]

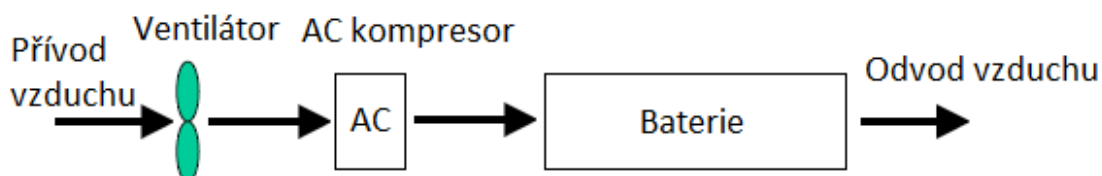


Obrázek 6 Zjednodušené schéma pasivního chlazení vzduchem, převzato [17]

Mezi automobily, které využívají pasivního chlazení, patří například Volkswagen e-Golf, Nissan Leaf, Honda CRZ a veškerá hybridní vozidla značky Toyota.

## 2.2 Aktivní chlazení vzduchem

Jedná se o modifikaci vzduchového chlazení, jelikož řídicí jednotka řídí teplotu chladicího média (ohřátí, chlazení), přičemž klimatizace automobilu dodává část výkonu pro chlazení vstupujícího vzduchu do baterie.



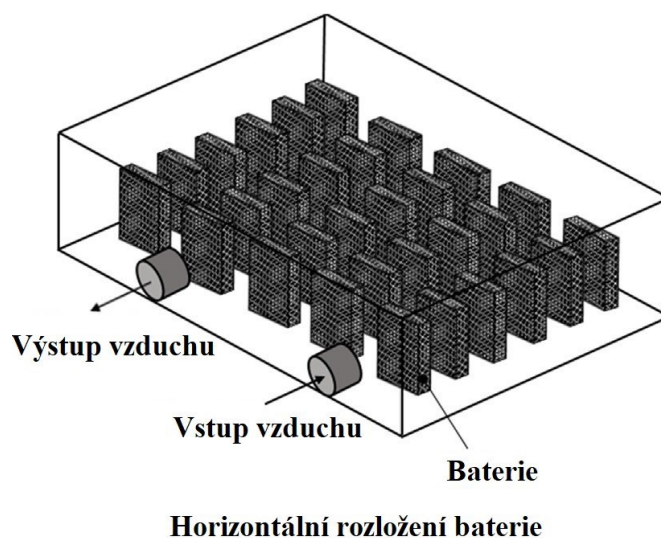
Obrázek 7 Zjednodušené schéma aktivního chlazení vzduchem, převzato [17]

Systém aktivního chlazení používá například hybridní automobil značky Ford Escape, který je vybaven třemi chladicími okruhy. Prvním z okruhů je okruh spalovacího motoru, který je shodný s konvenčními vozidly (spalovací motor). Dalším okruhem je chladicí okruh určen pro elektromotor a poslední okruh náleží okruhu baterie s výparníkem klimatizace. [15], [16]

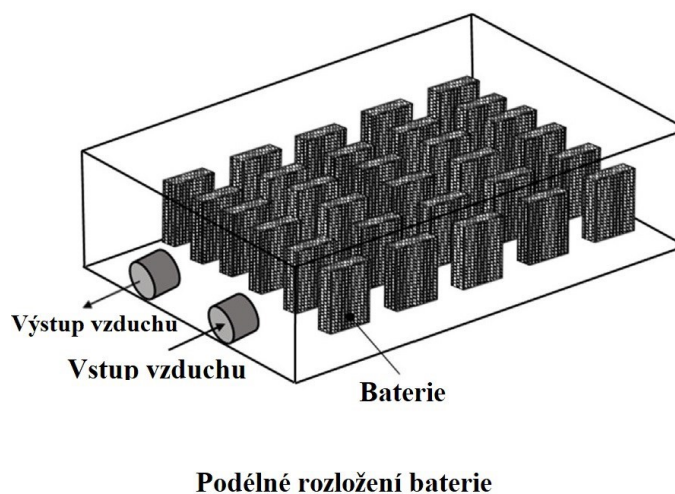
Proti pasivnímu vzduchovému chlazení disponuje tento systém vyšší účinnosti chlazení, jelikož rozdíl mezi chladícím médiem a články je větší. Systém pracuje na principu běžné klimatizace. Ovšem co se týče údržby, je aktivní chlazení vzduchem náročnější v porovnání s pasivním chlazením. Musí se pravidelně kontrolovat ventilátory, klapky a filtry. U elektricky poháněných vozidel se ale nejčastěji používá vodního chlazení, protože má ještě větší účinnost. [15], [16]

Mnoho výzkumů tvrdí, že u vzduchového chlazení záleží na uspořádání bateriových článků v bateriovém boxu. Při sledování tepelného toku akumulátorové jednotky bylo zkoumáno podélné a horizontální uspořádání baterií (viz **Obrázek 8**, **Obrázek 9**).





*Obrázek 8 Horizontální rozložení baterie, převzato [15]*



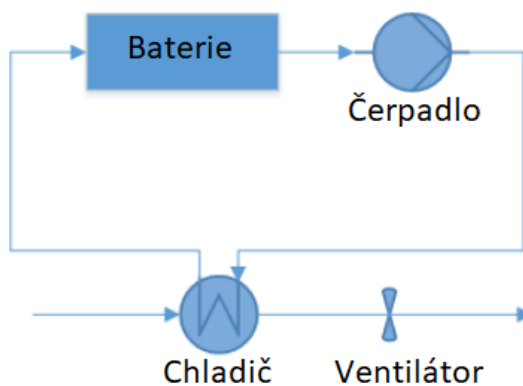
*Obrázek 9 Podélné rozložení baterie, převzato [15]*

Vědecké studie ukázaly, že horizontální rozložení baterií je v rámci testování účinnosti odvádění tepla vyšší než u podélného rozložení. Tento jev vysvětluje kratší dráha proudění vzduchu a větší plocha, která je určena k proudění studeného vzduchu.

### **2.3 Pasivní kapalinové chlazení**

Jedná se o nejjednodušší formu kapalinového chlazení, která využívá pasivního chladiče. Kapalina neboli teplonosné médium sloužící pro přenos tepla cirkuluje vlivem čerpadla v uzavřeném systému. Kapalina absorbuje teplo získané z baterií a uvolňuje jej prostřednictvím chladiče. Tento systém nemá schopnost topit, což je velkou nevýhodou. Výkon

chlazení také závisí na teplotě okolního vzduchu, jelikož ventilátory umístěné za chladičem dokážou zlepšit výkon chlazení. Pokud je ale teplota okolního vzduchu vyšší než teplota baterií, stává se vodní pasivní systém neúčinným. [16], [17]

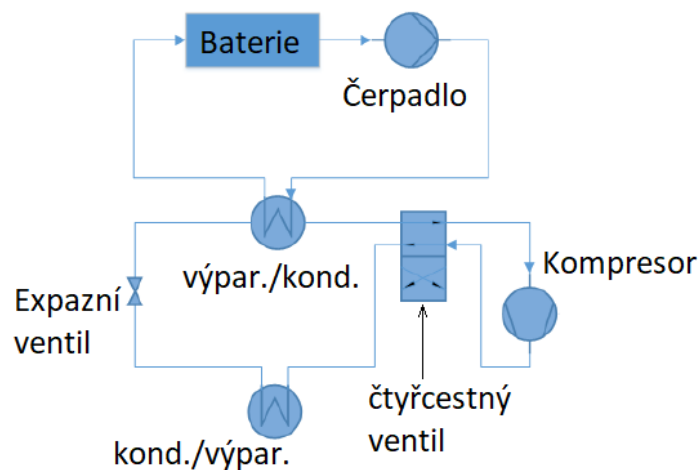


*Obrázek 10 Schéma pasivního kapalinového chlazení, převzato [16]*

## 2.4 Aktivní kapalinové chlazení

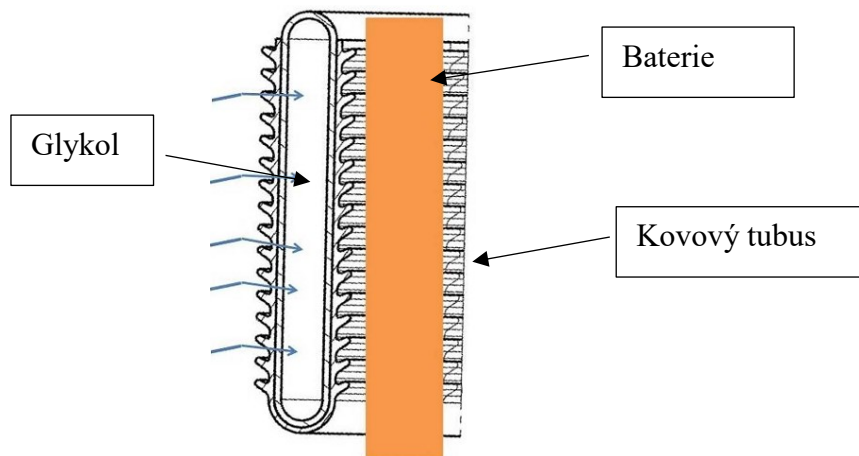
Nejčastěji používaným chlazením pro elektricky poháněná vozidla je právě aktivní kapalinové chlazení, a to hned z několika důvodů. Moderní elektrická vozidla odebírají vysoké proudy a tím se baterie daleko více zahřívají. Aktivní BTMS systémy se staly novodobým trendem elektrických vozidel a z tohoto důvodu se na vývoji podílí i externí firmy jako je Bosch nebo Valeo. Očekává se, že tento segment bude nadále růst s EV na trhu s automobily. V porovnání se systémem vzduchového chlazení je aktivní kapalinové chlazení komplexnější, ale i finančně náročnější. [16]

Aktivní kapalinové chlazení obsahuje dvě smyčky. Horní smyčka se nazývá primární a dolní sekundární. Primární smyčka je podobná smyčce v pasivním kapalném systému, kde je teplonosná kapalina cirkulována čerpadlem. Sekundární smyčka je zase obdobná jako smyčka klimatizace. Horní výměník tepla místo chladiče pracuje jako výparník, sloužící ke chlazení a spojuje obě smyčky. Během ohřevu se přepne čtyřcestný ventil a horní výměník tepla pracuje jako kondenzátor a dolní výměník tepla jako výparník. Provozní smyčka vytápění se také nazývá smyčka tepelného čerpadla. [16]



Obrázek 11 Schéma aktivního kapalinového chlazení, převzato [16]

Tesla Model S využívá termální odvod tepla a jako chladicí médium používá glykol v kapalně formě. Vzniklé teplo Tesla přenáší do chladicího cyklu. S ohledem na to, že Tesla využívá 7000 buněk k ochlazení, je důležité dbát na správné uspořádání nosičů chladicího média. Firma má patentovanou aplikaci pro systém, která využívá tvarovatelnou kovovou pásku, která je dutá a prochází v ní chladicí médium (viz **Obrázek 12**). Této pásce se také říká tubus. Chladicí trubice je propojena s buňkami. [1]



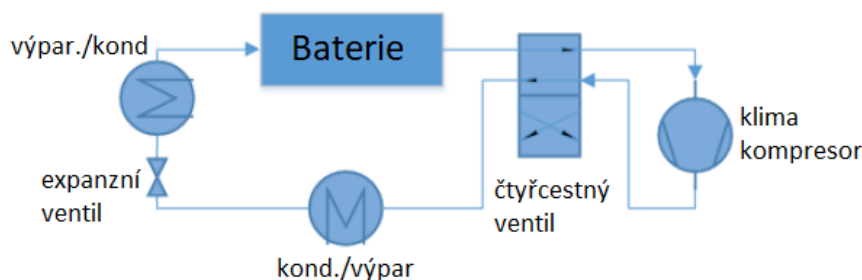
Obrázek 12 Chlazení v průřezu – Tesla, převzato [2]

## 2.5 Chlazení přímou expanzí

Podobně jako u aktivních kapalinových systémů se skládá chlazení přímou expanzí ze smyčky klimatizace. Rozdíl je v tom, že v systému chlazení přímou expanzí se používá chladivo klimatizace přímo jako teponosná kapalina cirkulující v okruhu baterií. [17]

Výhodou tohoto chlazení je jednodušší konstrukce ve srovnání s aktivním kapalinovým chlazením. S tím je spojená i nižší cena a úspora hmotnosti. Prvním vozidlem, které použilo tento systém chlazení, byla automobilka BMW se svým modelem i3.

Největší nevýhodou je eliminace vyhřívání baterií prostřednictvím chladicího média, proto je vytápění baterií řešeno odporovými kabely. Další nevýhodou je, že systém nemůže využívat například zbytkového tepla elektromotoru. Vytápění kabiny se realizuje například reverzním tepelným čerpadlem nebo konvenčním odporovým vytápěním. Automobilka BMW u svého modelu i3 používá tepelné čerpadlo, protože má vysokou účinnost a méně tak snižuje dojezd vozidla. [16], [17]

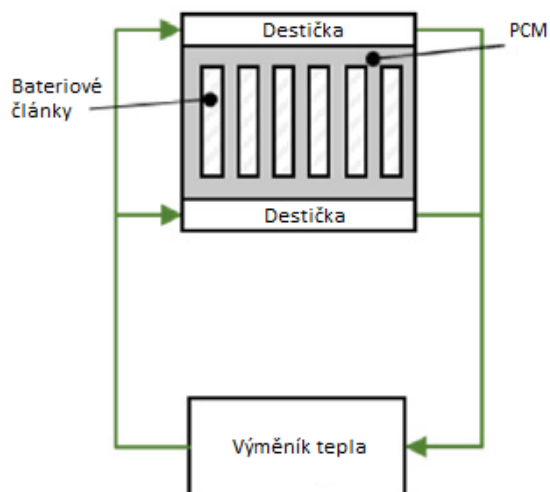


Obrázek 13 Schéma chlazení přímou expanzí, převzato [16]

## 2.6 „PCM“ chlazení – chlazení změnou fáze

Jedná se o technologii chlazení, která využívá akumulace energie formou tepla do tzv. bateriových panelů. Princip funguje na základě tání a tuhnutí materiálu při konstantní teplotě. U těchto procesů dochází k uvolnění nebo akumulaci latentního tepla a zároveň změně skupenství. Je nutné podotknout, že je nutností navázat na konvenční typ chlazení jako podpůrný systém.

Tento typ chlazení se zatím u sériově vyráběných vozidel nepoužívá, ovšem objevil se u speciálních závodních vozidel. Největší nevýhodou je přímý kontakt s bateriovými články, který představuje riziko požáru. [16]



Obrázek 14 Schéma PCM chlazení, převzato [17]

## 2.7 Srovnání vzduchového a kapalinového chlazení

Volba chladicího média má zásadní vliv pro přenos tepla, cenu a celkový výkon BTMS. Prostředkem vhodným pro přenos tepla může být vzduch, kapalina, materiál měnící fáze nebo jejich kombinace. [17]

Přenos tepla vzduchem funguje na základě usměrnění/foukání vzduchu přes bateriové moduly. Přenosu tepla kapalinou může být dosaženo trubicí kolem každého modulu, speciálně upraveným pláštěm, ponořením modulů do dielektrické kapaliny (přímý kontakt) nebo umístění bateriových modulů na vyhřívanou/chlazenou desku. Není-li kapalina v přímém kontaktu s moduly, může být vhodným médiem pro přenos tepla například kapalina na bázi vody a glykolu nebo u chlazení přímou expanzí shodné médium s náplní klimatizace. Jsou-li moduly ponořeny v teplotnosné kapalině, musí být kapalina dielektrická. Většinou se jedná o kapaliny na bázi křemíku nebo minerálních olejů, aby se zabránilo jakýmkoliv elektrickým zkratům.

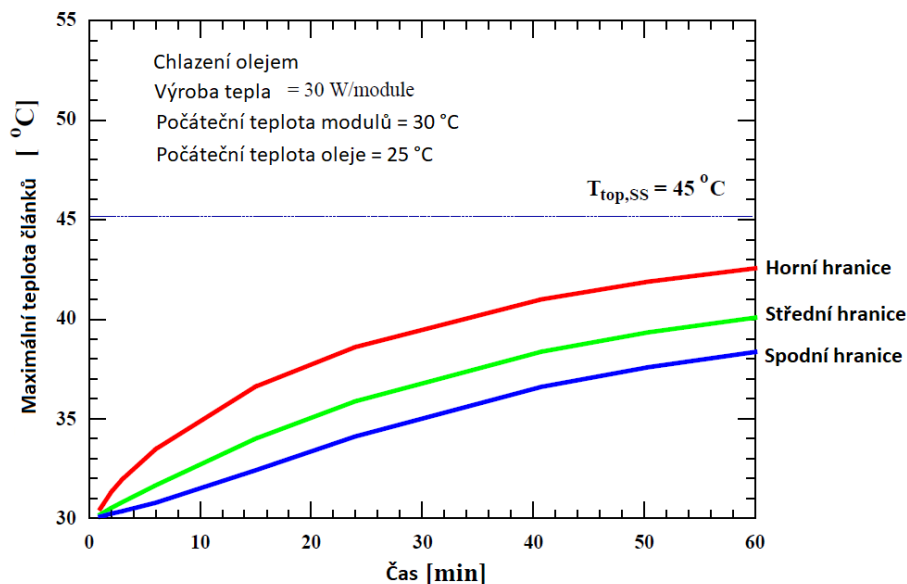
Použitím vzduchové chlazení může být nejjednodušším přístupem, který ale nemusí být tak účinný jako kapalinové chlazení. Rychlost přenosu tepla mezi stěnami modulu a teplotnosnou kapalinou závisí na tepelné vodivosti, viskozitě, hustotě a rychlosti kapaliny. Pro stejný průtok je rychlost prostupu tepla u praktických kapalin s přímým kontaktem (např. minerální olej) mnohem vyšší než u vzduchu, a to díky vyšší tepelné vodivosti kapalin. [17]

Vzhledem k vyšší viskozitě oleje a vyššímu výkonu čerpadla se však používá nižší průtok, takže koeficient prostupu tepla oleje je pouze 1,5 až 3x vyšší než u vzduchu. Tekutiny s nepřímým kontaktem mají obecně nižší viskozitu a vyšší tepelnou vodivost než většina olejů,

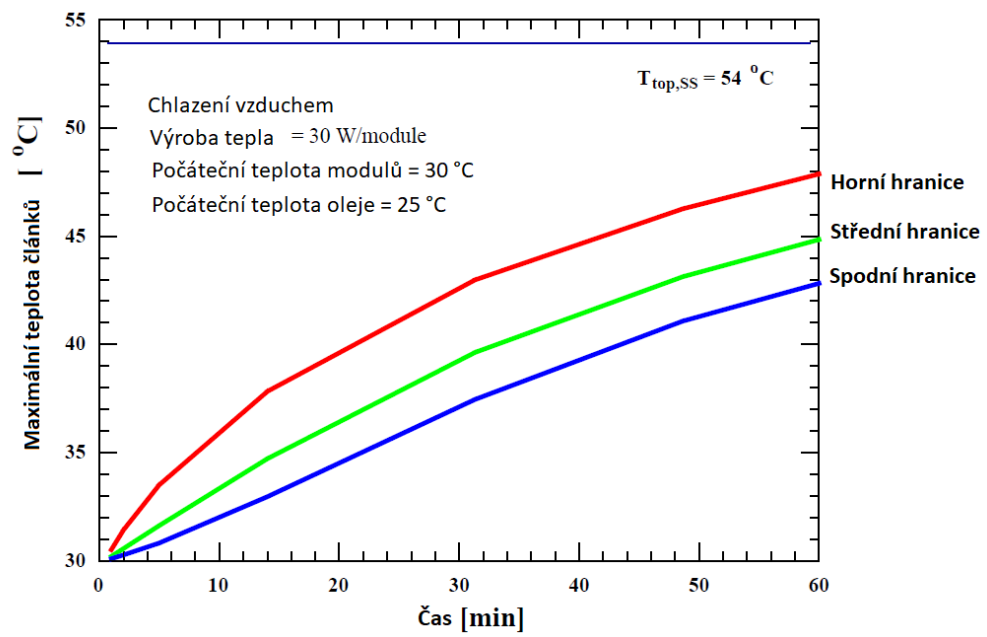
což vede k vyššímu koeficientu prostupu tepla. Protože však teplo musí být vedeno přes stěny, trubice a chlazené desky, účinnost se mírně snižuje. [17]

Ve výzkumu National Renewable Energy Laboratory byl porovnáván vzduch s přímým kapalinovým (olejovým) chlazením pro moduly VRLA. Byla zde zvolena hmotnost vzduchu při průtoku 50 g/s, která má za atmosférických podmínek 25 °C a objemový průtok 43 l/s. Při použití vztahů pro turbulentní toky byla průměrná přenosová rychlost 25 W/m<sup>2</sup>K. Stejný hmotnostní průtok minerálního oleje měl objemový průtok pouze 0,057 l/s, což vedlo k průměrné rychlosti přenosu tepla 57 W/m<sup>2</sup>K (2,3x vyšší než vzduch). Stejná hmotnostní průtoková rychlost s použitím vody a glykolu pro nepřímé chlazení vedla k objemovému průtoku 0,049 l/s a rychlosti přenosu tepla 390 W/m<sup>2</sup>K, ale je třeba vzít v úvahu odolnost izolačních stěn vůči prostupu tepla, která snižuje efektivní odvod tepla. [17]

Graf (viz **Obrázek 15**, **Obrázek 16**) znázorňuje maximální teplotu v horní, střední a dolní části buňky v závislosti na čase. Z grafu je patrné, že modul v bateriovém boxu chlazeného olejem je chladnější a dosahuje ustáleného stavu mnohem rychleji než bateriový box, který je chlazen vzduchem díky vyšší rychlosti prostupu tepla kapalinou (vyšší tepelná vodivost oleje). [17]



Obrázek 15 Graf chlazení olejem, převzato [17]



Obrázek 16 Graf chlazení vzduchem, převzato [17]

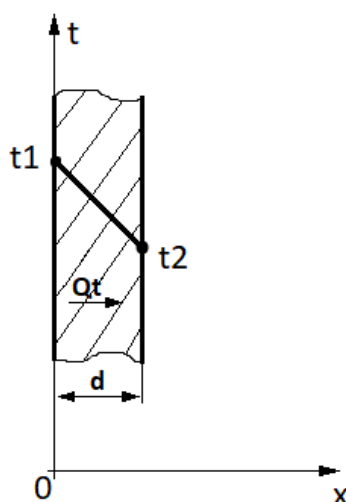
### 3 Teoretický základ sdílení tepla

Při průchodu elektrického proudu vodičem vzniká ztrátové teplo. V případě problematiky návrhu kapalinového chlazení se jedná o bateriové články. Vzniklé teplo z povrchu bývá odváděno třemi způsoby. Jedná se o tzv. sdílení tepla prostřednictvím kondukce, konvekce a sálání. [12], [13]

#### 3.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)

Jestliže první stěna pevného tělesa má vyšší teplotu než druhá stěna, pak teplo (tepelný tok) prochází tělesem od teplejší stěny ke stěně s nižší teplotou. Tento jev popisuje Fourierův zákon:

„Měrný tepelný tok  $Q_t$  [ $W \cdot m^{-2}$ ], tj. tepelný tok  $Q$  vztažený na jednotku plochy  $S$ , přenášený vedením v určité látce je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a má opačné znaménko než daný gradient.“ [12], [13]



Obrázek 17 Teplotní spád tepelného toku jednoduchou stěnou, převzato [12]

$$Q_t = \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta T \cdot S \quad (3.1)$$

$Q_t$  ... velikost tepelného toku [J]

$\lambda$  ... součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

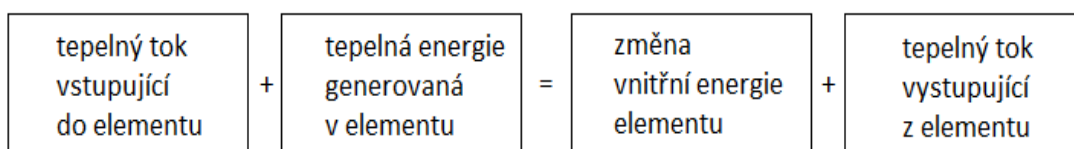
$d$  ... tloušťka desky [m]



$S$  ... plocha desky  $[m^2]$

$\Delta T$  ... rozdíl teplot  $[K]$

U praktických úloh je často nutností rozložení v 3D tělese. Z tohoto důvodu je nutné zavést diferenciální rovnice energie, které vychází z energetické bilance objemového elementu (viz **Obrázek 18**). [13], [14]

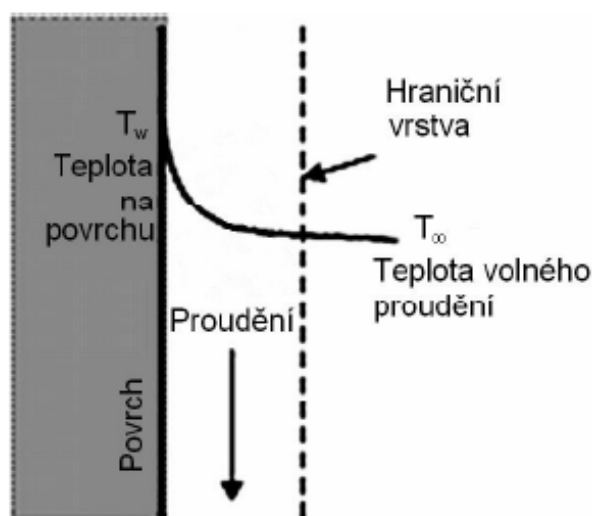


*Obrázek 18 Energetická bilance, převzato [14]*

### 3.2 Přenos tepla prouděním (konvekci)

Uskutečňuje se při proudění tekutiny přemísťováním makročástic tekutiny z oblasti jedné teploty do oblasti s jinou teplotou. Konvekce je tedy spojena bezprostředně s přenosem hmotnosti. [12], [13]

Současně s konvekci probíhá v tekutině kondukce – vedení tepla, dána pohybem mikročástic. Vyskytuje se vždy, stýkají-li se částice o různé teplotě. Sdílením tepla konvekci rozumíme spojení obou těchto dějů (vlastní konvekce a kondukce), ale konvekční složka ve většině případů převládá. [12], [13]



*Obrázek 19 Příklad sdílení tepla prouděním, převzato [14]*

$$Q_t = \alpha \cdot \Delta T \cdot S \quad (3.2)$$

$Q_t$ ... velikost tepelného toku [J]

$\alpha$  ... součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^2 \cdot K^{-1}$ ]

$S$  ... plocha desky [ $m^2$ ]

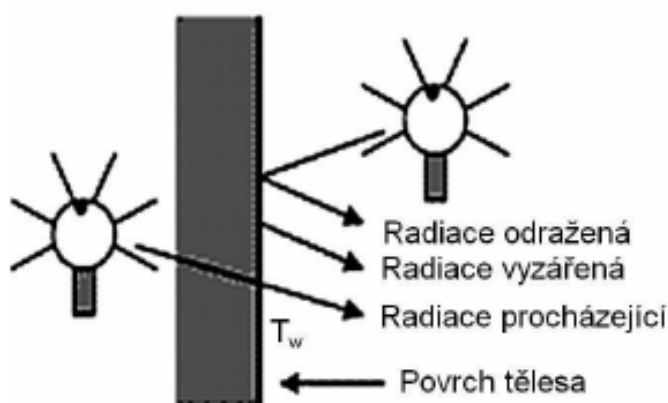
$\Delta T$ ... rozdíl teplot tekutiny a stěny [K]

Konvekce se podle povahy dělí na:

- nucenou (vzniká nuceným prouděním tekutiny),
- přirozenou (vzniká rozdílem hustoty tekutin),
- kombinovanou (vzniká superpozicí nucené + přirozené konvekce).

### 3.3 Přenos tepla zářením (sáláním)

Sdílení tepla sáláním čili radiací je třetím základním způsobem přenosu tepla. Sálání se vyskytuje v širokém měřítku v tepelně fyzikálních procesech, v jaderné energetice (zejména u vysokoteplotních reaktorů), ale samozřejmě i v klasické energetice (například v ohništích parních generátorů). [12], [13]



Obrázek 20 Přenos tepla zářením, převzato [14]

Tepelné sálání (záření) je druhem přenosu tepla pomocí elektromagnetických vln. Tyto vlny se šíří ve vakuu rychlostí světla  $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Elektromagnetické záření je

charakterizováno svojí vlnovou délkou  $\lambda$  a kmitočtem  $\delta$ . Pro tento typ přenosu není zapotřebí hmotného prostředí. Výkon vyzařujícího tělesa ( $Pr$ ) závisí na povrchu  $S$  a teplotě  $T$ . [14]

$$Pr = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad (3.3)$$

$Pr$  ... výkon vyzařujícího tělesa [W]

$\varepsilon$  ... emisivita [/]

$\sigma$  ... Stefan-Boltzmannova konstanta [W]

$S$  ... povrch tělesa [ $m^2$ ]

$T$  ... teplota [K]

Z rovnice tedy vyplývá, že zdrojem záření může být jakýkoliv předmět. Záření, které těleso přijme z části absorbuje, odrazí a následně přemění na tepelnou energii. Existují tělesa, která všechnu energii pohltní. Jedna se o tzv. absolutně černá tělesa.

### 3.4 Tepelné vlastnosti materiálu

Mezi nejdůležitější výpočetní parametry termodynamiky patří materiálové vlastnosti. Ty udávají, jak se daný materiál chová při různých teplotách. Při změnách teploty se mění mechanické a deformační vlastnosti, které ovlivňují například tuhost nebo pevnost materiálu. Každý materiál je schopen vést teplo. Mezi základní materiálové vlastnosti patří tepelná kapacita a tepelná vodivost. [4]

Při návrhu kapalinového chlazení je nutností orientovat se v problematice tepelných vlastností, jelikož podle hodnot tepelné kapacity a tepelné vodivosti byly navrženy jednotlivé konstrukční části.

## Tepelná kapacita

Jedná se o konstantu úměrnosti, která vyjadřuje úměrnost mezi vlastní teplotou a teplotou dodanou do tělesa. Určuje, kolik tepla musí být předmětu dodáno, aby se jeho teplota zvýšila o jeden stupeň teplotního rozdílu. Jednotkou je  $[J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$ . [4]

$$Q = C \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.4)$$

$C$  ... tepelná kapacita  $[J \cdot K^{-1}]$

$Q$  ... dodané teplo  $[J]$

$T_2$  ... koncová teplota  $[K]$

$T_1$  ... počáteční teplota  $[K]$

## Měrná tepelná kapacita

Je množství tepla, které je třeba dodat 1 kg látky, aby se zahřála o jeden stupeň teplotního rozdílu. Jednotkou je  $[J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}]$ . [4]

$$Q = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.5)$$

$c$  ... měrná tepelná kapacita  $[J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}]$

$Q$  ... dodané teplo  $[J]$

$m$  ... hmotnost  $[kg]$

$T_2$  ... koncová teplota  $[K]$

$T_1$  ... počáteční teplota  $[K]$

## Tepelná vodivost

Tepelná vodivost udává, jak velké množství tepla dokáže látka přenést za časovou jednotku v daném prostředí. Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  slouží jako ukazatel toho, jestli je látka tepelným vodičem nebo tepelným izolantem. Dobrý tepelný vodič má vysokou hodnotu součinitele tepelné vodivosti a nízký tepelný odpor. Nejlepší tepelné vodiče jsou například měď, stříbro, hliník. [4]

*Tabulka 7 Teplotní materiálové vlastnosti, převzato [4]*

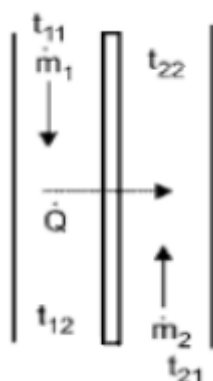
Materiál	Součinitel tepelné vodivosti ( $\lambda$ ) [W · m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita [J · K <sup>-1</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
Hliník	237,5	900
Olovo	35	128
Měď	400	386
Stříbro	428	236
Železo	79	465

## 4 Výpočet výměníku tepla

Tepelné výměníky jsou v okruhu kapalinového chlazení používány k přenosu tepelné energie mezi primárním a sekundárním okruhem (výparník) a k ochlazení páry kompresoru (kondenzátor). Tepelná energie přechází mezi dvěma tekutinami z teplejšího do chladnějšího média. Požadavky na výměníky tepla v okruhu kapalinového chlazení jsou:

- minimalizace rozměrů,
- bezpečnost provozu,
- odolnost použitých materiálů,
- jednoduchá výroba,
- nízký pokles tlaku u proudících médií.

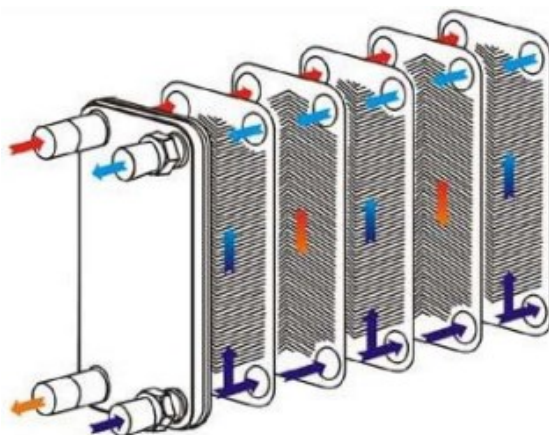
Na základě požadavků jsou nejvhodnější tzv. deskové výměníky tepla. Jedná se o rekuperační výměníky, kde k výměně tepla mezi pracovními látkami dochází přes stěnu, která musí mít dobrou tepelnou vodivost (viz **Obrázek 21**).



*Obrázek 21 Rekuperační výměník, převzato [6]*

### 4.1 Deskové výměníky

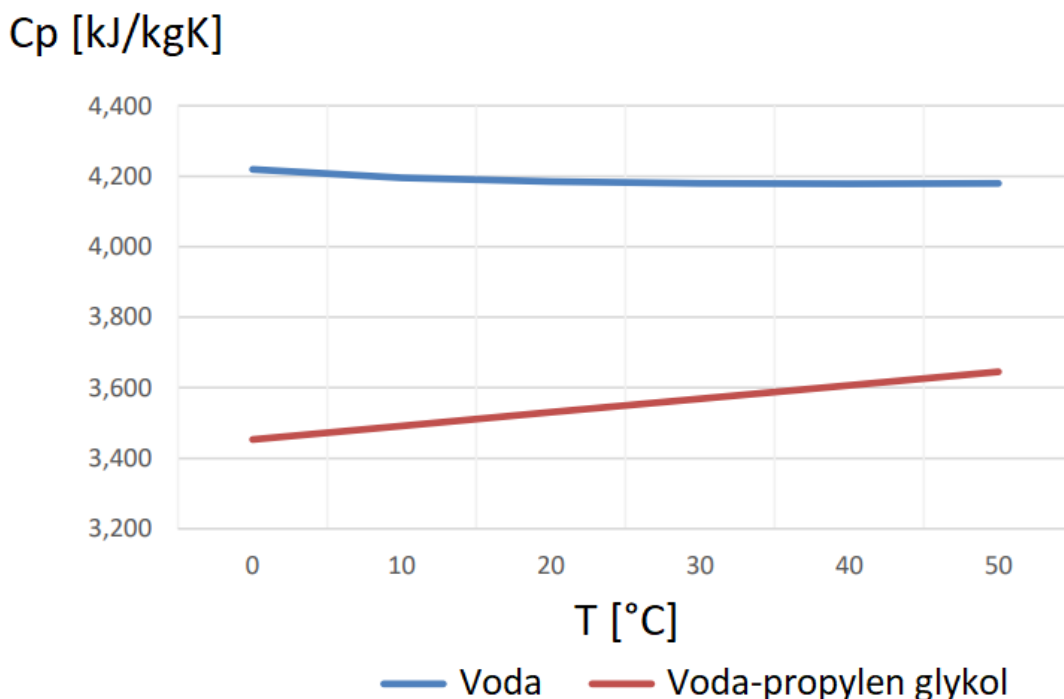
U deskových výměníků tvoří teplosměnnou plochu tenké nerezové desky (plechy), které jsou k sobě pevně slisovány. Nerezové desky obsahují čtyři otvory, ale pro každý kanál jsou funkční pouze dva z nich. Zbylé dva jsou těsnicí lištou utěsněny. Tyto výměníky pracují na principu střídání jednotlivých párů aktivních otvorů. To má za následek střídání médií v lichých a sudých mezerách mezi trubky (viz **Obrázek 22**). [6]



Obrázek 22 Deskový výměník, převzato [6]

## 4.2 Výběr chladicího média

Důležitým parametrem při výpočtu výměníku tepla je výběr chladicího média. Použití vody jako chladicího média je v případě aplikace v automobilovém průmyslu nepřípustné, jelikož může dojít ke korozi a zamrznutí celého systému. Nejrozšířenějšími chladivými jsou etylenglykol a propylenglykol. Etylenglykol je alkohol, který je bezbarvý a bez zápachu. V dnešní době se od etylenglykolu opouští, jelikož se jedná o vysoce toxickou látku. Propylenglykol má podobné vlastnosti jako etylenglykol, ale jeho velkou výhodou je netoxičita. Obě zmíněné látky tvoří nejčastěji koncentrát s vodou mezi 40-50 %. [5]



Obrázek 23 Srovnání měrné tepelné kapacity vody a 50% koncentrátu, převzato [5]

Graf (viz **Obrázek 23**) představuje srovnání měrné tepelné kapacity koncentrátu a vody. Čím vyšší je hodnota, tím menší bude nárok na hmotnostní průtok kapaliny. Z grafu je patrné, že tepelná kapacita koncentrátu je stále na velmi dobré úrovni ve srovnání s vodou. Z tohoto důvodu byla při výpočtu použita hodnota tepelné kapacity koncentrátu voda-propylenglykol 50% v závislosti na teplotě. [5], [6]

Tepelné změny v lithium-iontových článcích a s nimi spojené ztrátové teplo hrají rovněž důležitou roli při výpočtu. Pro správné určení tepelných změn článku je potřeba počítat se všemi příspěvky jednotlivých druhů tepel. Jedná se o teplo vznikající elektrochemickou reakcí, teplo vznikající vlivem ohmických ztrát (Joulové teplo) a reverzibilní reakční teplo, které vzniká v důsledku změny entropie během nabíjení a vybíjení.

V našem případě nás zajímá ztrátové (Joulové) teplo, jelikož se jedná o parametr, na kterém závisí výpočet a následná hodnota pro výběr výměníku tepla. Joulové teplo se často uvádí ve formě ztrátového výkonu. Ztrátový výkon lze vypočítat podle vztahu:

$$P = R \cdot I^2 [W], \quad (4.1)$$

kde ztrátový výkon  $P [W]$  tvoří elektrický odpor  $R [\Omega]$ , kterým protéká proud  $I [A]$ . V každém vodivém materiálu dochází k průchodu elektrického proudu až po přiložení napětí, které může být definováno jako elektrické pole s intenzitou  $E [V/m]$ . U vozidel na elektrický pohon je používáno napětí 12 V.

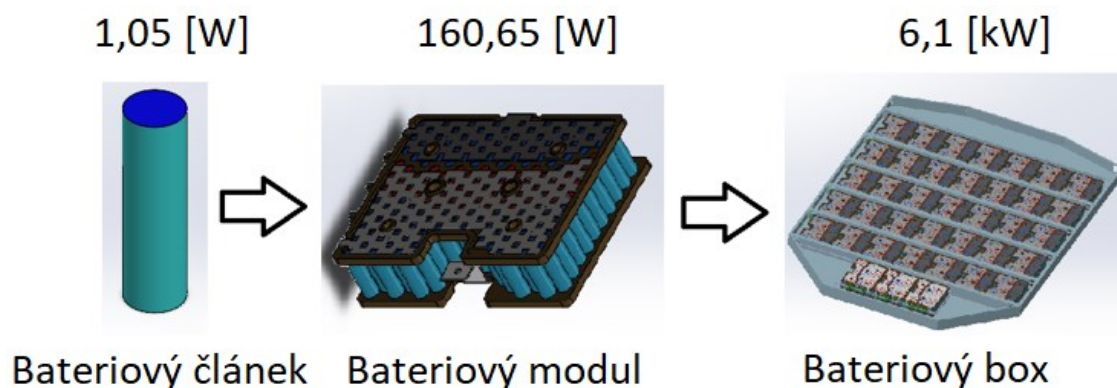
Podle výrobce vybraných bateriových článků může elektrický odpor dosahovat hodnot až 42 m $\Omega$ , což je hodnota, se kterou bylo počítáno při návrhu vodního chlazení. Maximální proud, který může procházet bateriovým článkem je 5000 mA. Výsledek po dosazení hodnot vypadá takto:

$$P = 0,042 \cdot 5^2 = \mathbf{1,05\ W}.$$

Dle vzorce 4.1 vychází, že jeden bateriový článek bude generovat ztrátový výkon o hodnotě 1,05 W.



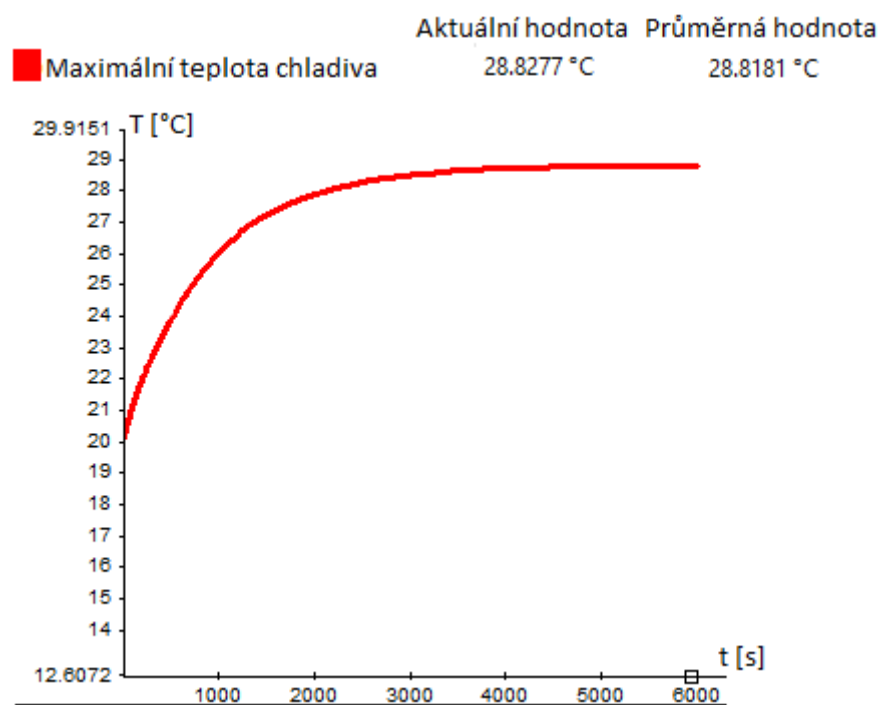
Výměník tepla je součástí návrhu kapalinového chlazení, které je navrženo pro 38 modulů osazených 153 články (viz **Obrázek 24**). [7]



*Obrázek 24 Ztrátový výkon aplikován na bateriový box*

Výpočet výměníku tepla vychází ze dvou rovnic. Jedná se o rovnici tepelné bilance a rovnice prostupu tepla. Výpočtem těchto rovnic lze zjistit potřebný hmotnostní tok a potřebnou teplosměnnou plochu, která je důležitá při výběru výměníku tepla. [5], [6]

Teplota  $T_1$  byla zjištěna na základě simulace, která zahrnovala termální analýzu v kombinaci s prouděním chladicí kapaliny. Vstupní teplota chladiva byla nastavena na 12 °C, přičemž výstupní hodnota dosáhla hodnoty téměř 29 °C (viz **Obrázek 25**). Tato hodnota byla použita pro výpočet výměníku tepla (viz kapitola 4.3). Jednalo se o simulaci druhé varianty, jelikož dokázala udržet bateriové články v bezpečném teplotním intervalu na rozdíl od 1. varianty.



Obrázek 25 Výstupní hodnota chladicí kapaliny

### 4.3 Rovnice tepelné bilance

Při návrhu výměníku tepla lze použít rovnici tepelné bilance, ze které lze vyjádřit hmotnostní tok chladiva. K následnému výpočtu je zapotřebí znát vstupní parametry, které byly zjištěny v předchozích kapitolách (viz **Tabulka 8**).

Tabulka 8 Vstupní parametry pro rovnici tepelné bilance

Primární okruh	Sekundární okruh	Legenda
$T_1 = 29 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_3 = 10 \text{ [}^\circ\text{C]}$	T ... teplota
$T_2 = 12 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_4 = 27 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$\Delta t$ ... teplotní rozdíl
$\Delta t = 5 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$\Delta t = 5 \text{ [}^\circ\text{C]}$	Q ... tepelný tok
$Q_1 = 6,1 \text{ [kW]}$	$Q_2 = 6,1 \text{ [kW]}$	$c_p$ ... střední tep. kapacita
$c_{p1} = 3,52 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	$c_{p2} = 3,52 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	m ... hmotnostní tok látky

Výpočet:

$$Q_1 = m_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta t$$

$$Q_2 = m_2 \cdot c_{p2} \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

$$m_2 = \frac{Q_2}{c_{p2} \cdot \Delta t} = \frac{6,1}{3,52 \cdot 17}$$

$$m_2 = \frac{Q_2}{c_{p2} \cdot \Delta t} = \frac{6,1}{3,52 \cdot 17}$$

$$m_1 = 0,1 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] = 0,36 \text{ [m}^3\text{/h]}$$

$$m_1 = 0,1 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] = 0,36 \text{ [m}^3\text{/h]}$$

#### 4.4 Rovnice prostupu tepla

Prostupem tepla rozumíme přenos tepelné energie z prostoru s první tekutinou (primární okruh) oddělenou pevnou stěnou od prostoru s druhou tekutinou (sekundární okruh). Základní prostupy tepla uvažujeme rovinnou stěnou a jednotlivé postupy jsou uvedeny v kapitole **Teoretický základ sdílení tepla**. K následnému výpočtu je zapotřebí znát vstupní parametry (viz **Tabulka 9**). Součinitel prostupu tepla se určuje na základě chladicího média a materiálu, který je použit na teplosměnné stěně výměníku.

*Tabulka 9 Vstupní parametry pro rovnici prostupu tepla*

Vstupní parametry	Legenda
$Q_z = 6,1 \text{ [kW]}$	$Q_z \dots$ tepelný tok
$k = 6000 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$	$k \dots$ součinitel prostupu tepla
$\Delta t = 1 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$\Delta t \dots$ střední logaritmický teplotní spád
	$S \dots$ velikost teplosměnné plochy

**Výpočet:**

$$Q_z = k \cdot \Delta t \cdot S \quad (4.3)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{d} + \frac{1}{\alpha_2}} = 6000 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]} \quad (4.4)$$

$$S = \frac{Q_z}{k \cdot \Delta t} = \frac{6105}{6000 \cdot 1} = 1 \text{ m}^2$$

Hodnota  $1 \text{ m}^2$  se dá rozpočítat na určitý počet desek, kde je zapotřebí zohlednit rezervu systému. U deskových výměníků se rezerva zohledňuje zvýšením počtu desek, ty jsou paralelně řazené, a tak dojde k poklesu průtoku na kanál. To má za následek snížení účinnosti a také zanášení. Z tohoto důvodu se považuje vhodná rezerva 0-15 %. Výpočtem byla stanovena minimální potřebná teplosměnná plocha výměníku tepla  $1 \text{ m}^2$  a hmotnostní průtok, který musí dosahovat hodnot  $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ . Na základě výpočtu (viz **4.2** a **viz 4.3**), byl vybrán potřebný výměník tepla.

Podrobně je problematika sdílení tepla popsána v kapitole **Teoretický základ sdílení tepla**, ze které také vychází rovnice prostupu tepla (viz **kapitola 4.4**).

Pro aplikaci kapalinového chlazení vozidla Titan byl vybrán výměník tepla SWEP V80H, který je vyvinut pro rozsah 5 až 80 kW. Tím pokrývá většinu průmyslových aplikací, kde je potřeba výparník. Zvolený výměník tepla je vyhovující na základě vypočtených hodnot,

přičemž je zde volba navýšení počtu desek z důvodu použití odlišné chladicí kapaliny (viz **Obrázek 26**).



*Obrázek 26 Výměník tepla SWE P V80H*

## 5 Konstrukční návrh kapalinového chlazení bateriového boxu

Tato kapitola se zabývá konstrukčním návrhem dvou variant chladících systému, které jsou popsány níže.

### 5.1 Návrh s tvarovaným plechem (1. varianta)

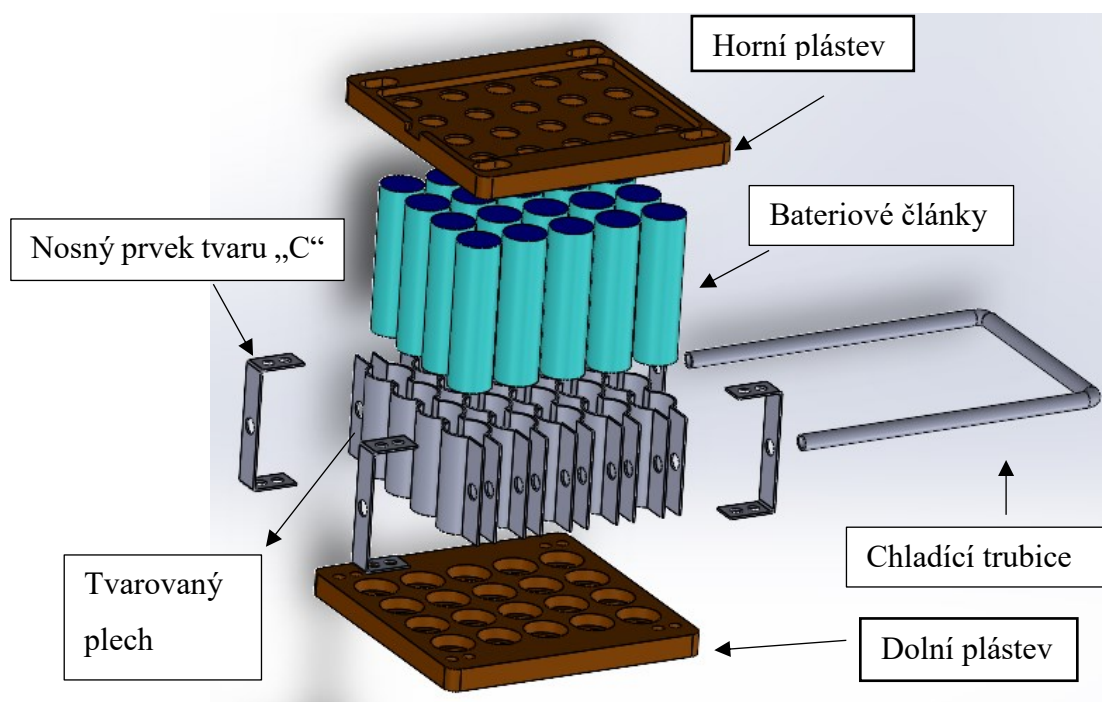
V prvním návrhu byly bateriové články uloženy mezi dvě plástve, které mohou být vyrobeny z Textitu nebo ABS plastu. Textit dosahuje vyšší pevnosti než ABS plast, ale nedosahuje vysoké míry houževnatosti. Výhodou Textitu je, že neztrácí pevnost v závislosti na teplotě. ABS ztrácí pevnost při 100 °C. Pro následnou výrobu je doporučeno použít jako pojivo epoxidové lepidlo, které dosahuje dostatečné pevnosti a houževnatosti pro daný spoj.

Jednotlivé bateriové články obepíná tvarovaný plech, který jednak slouží k přenosu tepla a k následnému chlazení, ale také fixuje bateriové články. Na bočních stranách tvarovaného plechu je umístěna díra, kterou v návrhu prochází chladicí trubice. Při CFD analýze byla přidělena této části slitina hliníku, která má obecně velmi dobré vlastnosti pro odvod tepla.

Plástve modulu je zapotřebí upevnit, aby nedocházelo k vychýlení a držely články v jednotném směru. Z tohoto hlediska byl použit nosný prvek tvaru „C“.

Chladicí prvek bateriového modulu tvoří chladicí trubice, která prochází každým tvarovaným plechem. Spojení k plechům může zajistit pájený spoj nebo matice. Celkový pohled bateriového modulu (viz **Obrázek 27**).

Pro tento modul byla vytvořena výkresová dokumentace (viz **Příloha výkresové dokumentace**), jelikož byl použit pro experimentální účely (viz **kapitola 6**).



Obrázek 27 Bateriový modul s tvarovaným plechem v rozloženém pohledu

## Výsledky simulace

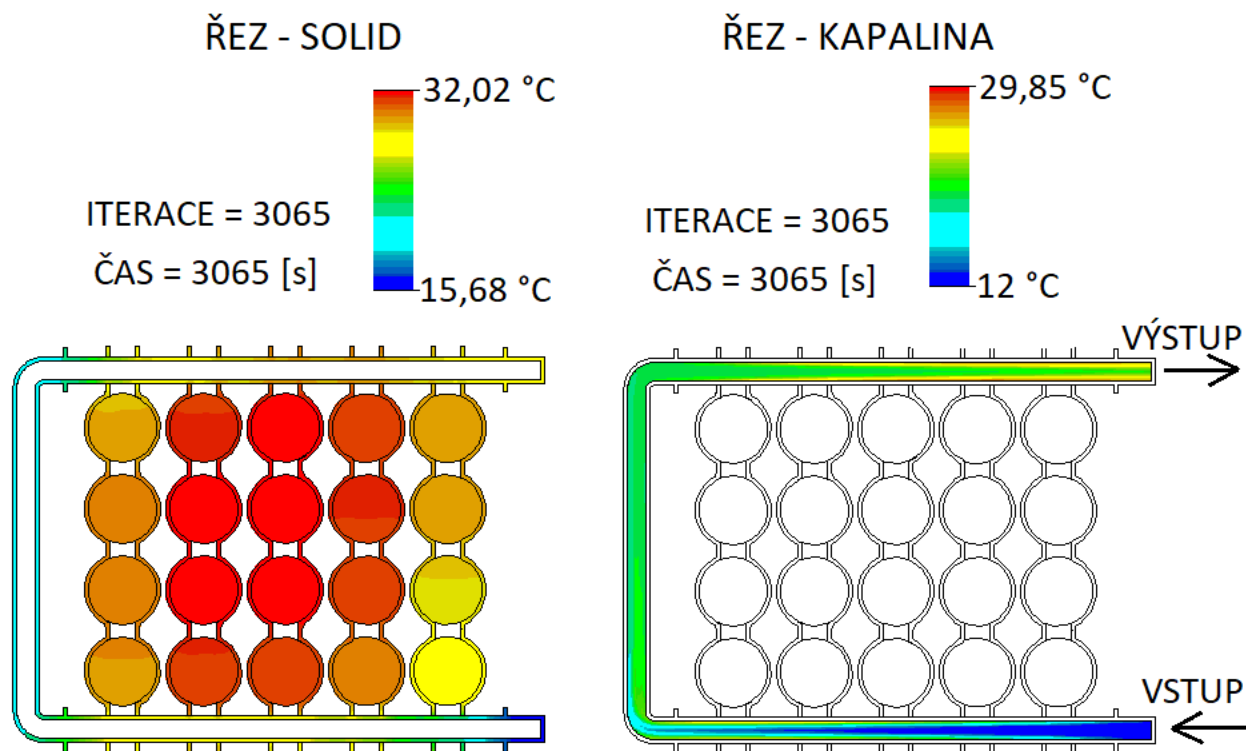
Parametry zvolené v simulaci (viz **Tabulka 10**) vycházely z materiálových vlastností jednotlivých částí a vstupní rychlost byla nastavena v návaznosti na dostupné čerpadla, která se používají v chladících okruzích automobilu (10 l/min). Ztrátový výkon článku byl nastaven na 1,05 W. Volba materiálu u bateriových článků byla zjištěna z vědeckých studií, které rovněž pro zjednodušený model použili slitinu hliníku. [8]

Tabulka 10 Parametry simulace modulu s tvarovaným plechem

Komponent	Zvolený materiál
Bateriový článek	Al 6061
Plástev	Polykarbonát
Tvarovaný plech	Al 6061
Chladicí trubice	Al 6061
Chladivo	Voda

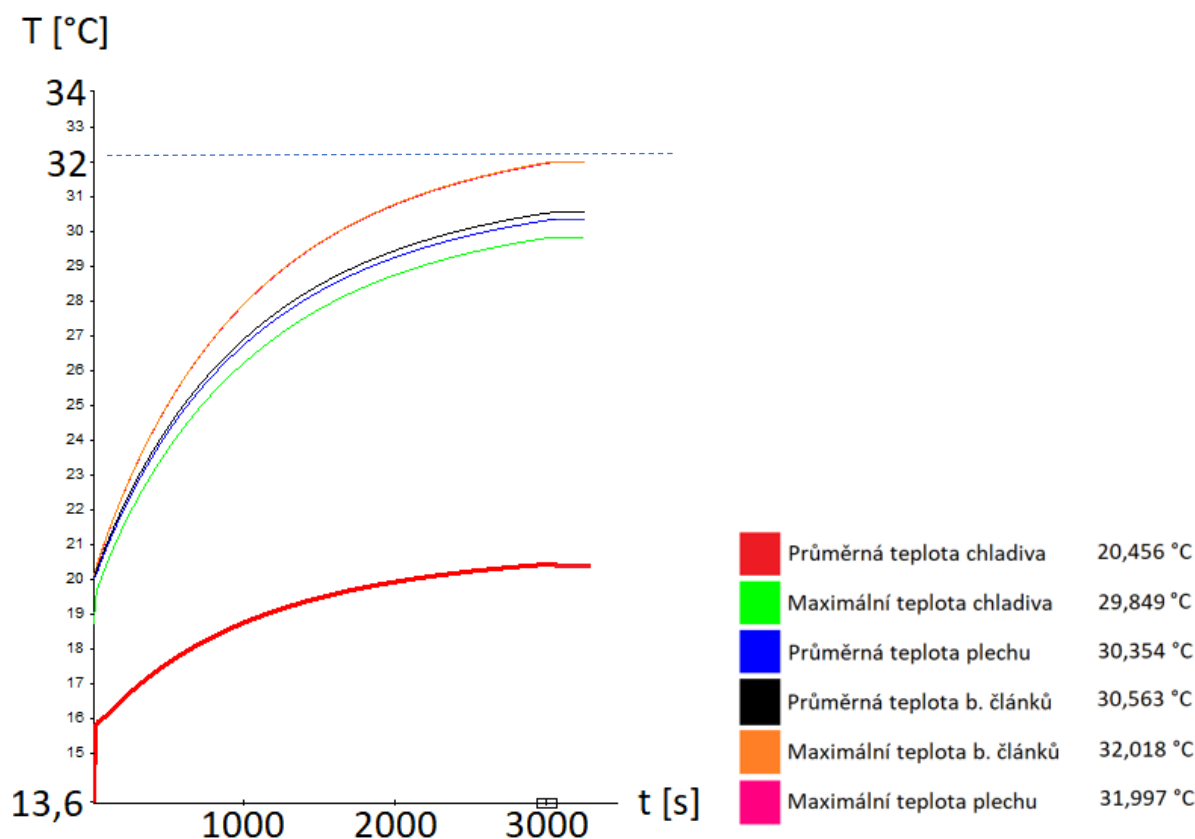
Výsledky simulace ukázaly, že návrh s tvarovaným plechem pro tuto konfiguraci dosahuje dobrých výsledků. Přenos tepla závisí na styčné ploše mezi bateriovým článkem a tvarovaným plechem. To znamená, že je velice důležitá přesnost výroby plechu a také volba materiálu.

Plech musí přenést co největší množství tepla, které poté chladivo v trubici prostřednictvím proudění odvádí pryč (viz **Obrázek 28**).



*Obrázek 28 Řez simulace s tvarovaným plechem - solid, kapalina*

Maximální teplota chladicí kapaliny v ustáleném stavu činila 29,85 °C. Maximální teplota bateriových článků dosahovala v konečné fázi hodnoty 32,02 °C, což je v bezpečném teplotním intervalu (viz **Obrázek 29**). Reálný modul ovšem obsahuje 153 bateriových článků a jejich uspořádání umožňuje obepínat modul pouze z jedné strany. Návrh s tvarovaným plechem umožňuje sérioparalelní zapojení článků, takže může být použit pro bateriový box vozidla, který využívá právě sérioparalelní zapojení. Průběh grafu byl vypnut při dosažení ustálené hodnoty všech sledovaných parametrů.



Obrázek 29 Výsledky simulace návrhu s tvarovaným plechem

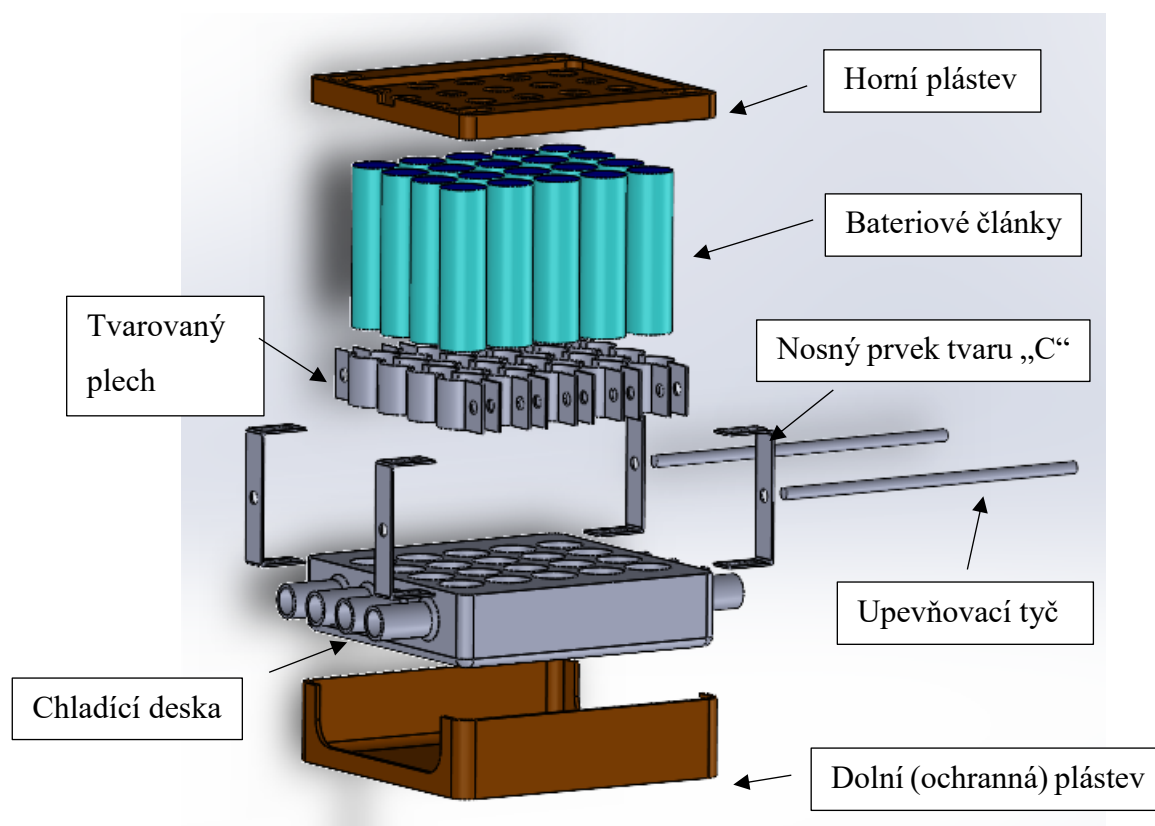
## 5.2 Návrh s chladicí deskou (2. varianta)

Další návrh, který byl určen pro simulaci proudění, rovněž obsahuje plástev, která může být z textitu či ABS plastu, ale pouze v horní části. Pro následnou výrobu je zde doporučeno použití epoxidového lepidla. Spodní část tvoří chladicí deska, která je vhodná pro výrobu třískovým obráběním. Vhodným materiálem jsou slitiny hliníku. Otvory na obou stranách slouží k průchodu chladicího média. Důležitým faktorem, který vedl k návrhu chladicí desky, byl experiment, který ukázal, že bateriové články jsou nejvíce zahřívány na čelních plochách.

Ve spodní části modulu byla navržena ochranná plástev, která zaručí, aby nedocházelo ke zkratu. Tato plástev může být vytištěna například z ABS plastu na 3D tiskárně.

Jednotlivé články obepíná tvarovaný plech, který drží jednotlivé články pohromadě a také v kombinaci s nosným prvkem tvaru „C“ zajišťuje pevnost a celistvost modulu. Otvory chladicí desky musí vyrobeny s mírnou vůlí, aby nedocházelo k deformaci článků vlivem zvýšené teploty (viz **Obrázek 30**).





Obrázek 30 Bateriový modul s chladicí deskou

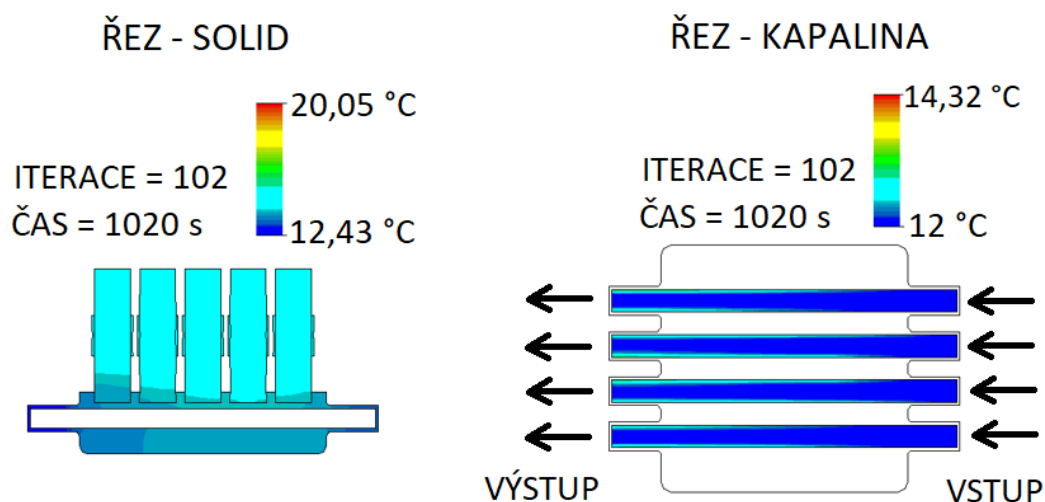
## Výsledky simulace

Parametry opět navazovaly na materiálové vlastnosti jednotlivých částí modulu a průtok kapaliny byl nastaven na 10l/min. Ztrátový výkon bateriových článků byl nastaven na hodnotu 1,05 W. Všechny použité materiály, které byly použity, jsou zobrazeny (viz **Tabulka 11**).

Tabulka 11 Parametry simulace modulu s chladicí deskou

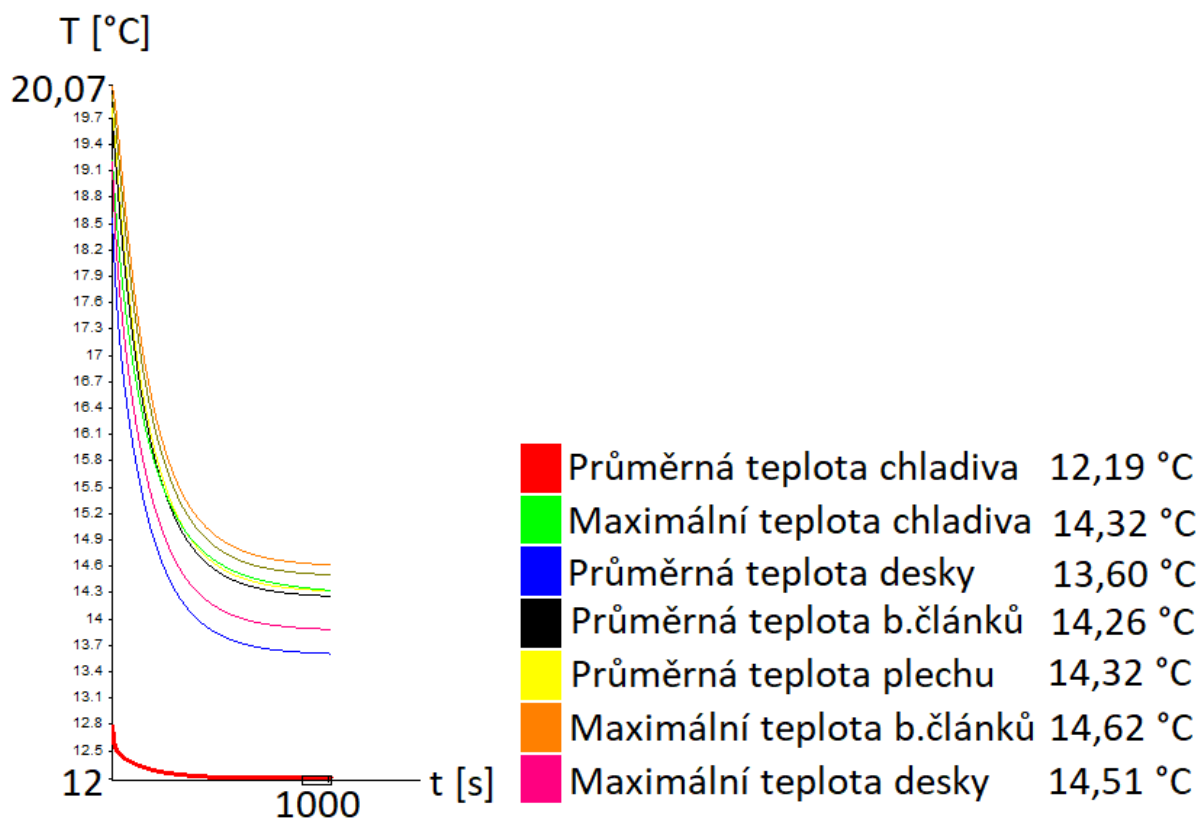
Komponent	Zvolený materiál
Bateriový článek	Al 6061
Plástev vč. ochranné	Polykarbonát
Chladicí deska	Al 6061
Nosný prvek tvaru „C“	Al 6061
Upevňovací tyč	Al 6061
Tvarovaný plech	Al 6061
Chladivo	Voda

Tvarovaný plech v tomto návrhu měl zajistit pouze články ve správném směru a eliminovat tak deformaci bateriových článků. Simulace ukázala, že pokud bychom zajistili potřebnou přesnost a tím i maximální styčnou plochu s článkem, může tvarovaný plech sloužit jako pasivní chladicí prvek. Řez, který byl získán ze simulace je zobrazen (viz **Obrázek 31**).



*Obrázek 31 Řez simulace s chladicí deskou - solid, kapalina*

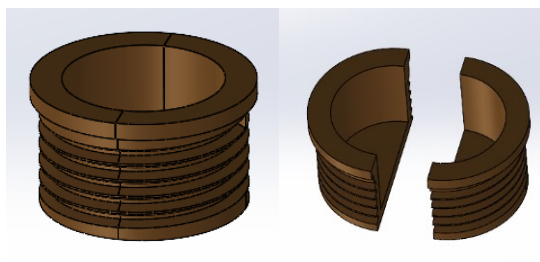
Zmenšený modul s chladicí deskou dosáhl velmi dobrých hodnot. Tato konfigurace zajistila maximální teplotu bateriových článků pouze 14,62 °C, což značí lepší výsledky jako návrh (viz kapitola 5.1). Maximální teplota chladicí kapaliny dosáhla hodnoty 14,32 °C (viz **Obrázek 32**). Na základě příznivých hodnot byl tento návrh určen pro konfiguraci bateriového boxu vozidla Titan, kde je umístěno 153 článků v jednom modulu.



Obrázek 32 Výsledky simulace návrhu s chladicí deskou

### 5.2.1 Modifikace se závitovými pouzdry

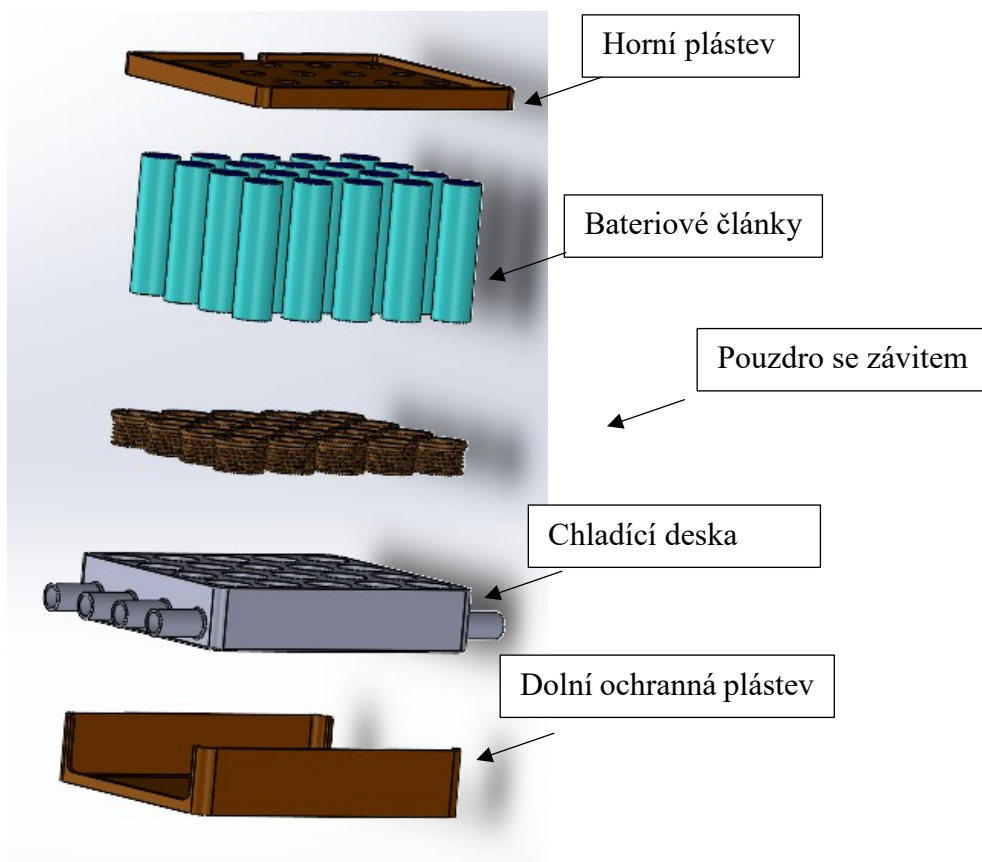
Jedná se o modifikaci návrhu s chladicí deskou, kde místo kombinace nosného prvku tvaru „C“ s tvarovanými plechy, bylo navrženo válcové pouzdro se závitem (viz **Obrázek 33**).



Obrázek 33 Válcové pouzdro se závitem

Válcové pouzdro se závitem slouží pro uložení jednotlivých článků do chladicí desky, která má rovněž závit. Otvor válcového pouzdra musí být navržen tak, aby měl mírnou vůli, kvůli bezpečnému uložení článků. Ovšem po dotažení pouzdra do chladicí desky musí být bateriový článek bezpečně upevněn.

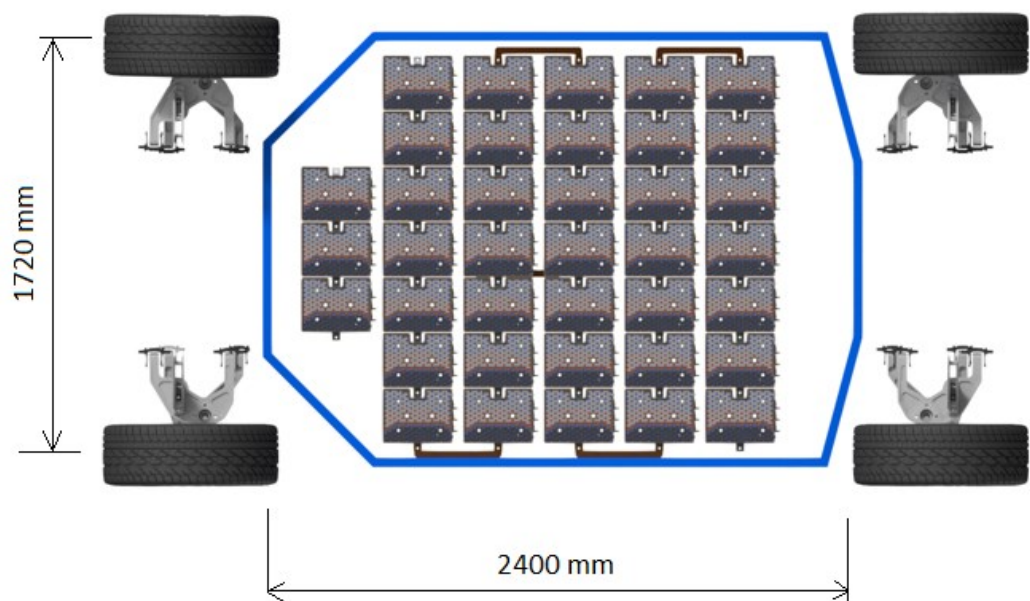
Princip spodní části byl popsán v kapitole (viz kapitola 5.2), který je v tomto případě shodný. Pohled v rozloženém stavu (viz **Obrázek 34**).



*Obrázek 34 Bateriový modul s chladicí deskou a pouzdry*

### 5.3 Srovnání vybraných variant

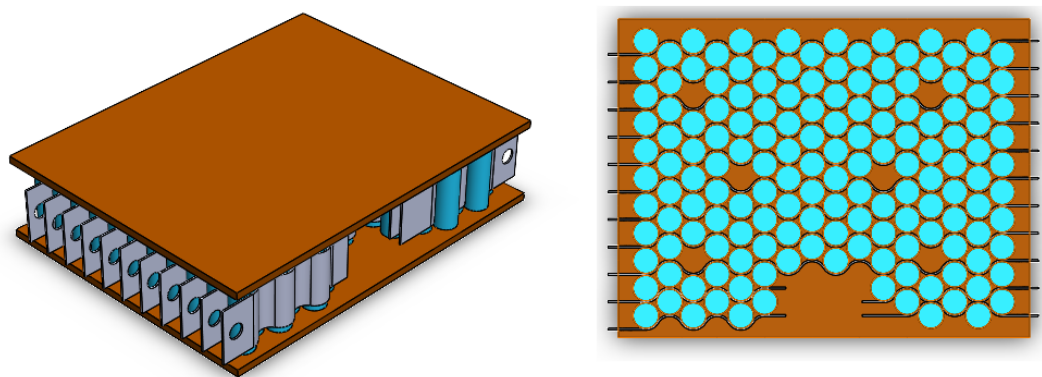
Umístění baterií ve vozidle bylo navrženo na základě rozvržení náprav a pohonu vozidla. Pro umístění baterií byla zvolena podlahová část za účelem nízké polohy těžiště nad vozovkou. Níže (viz **Obrázek 35**) je zobrazeno uspořádání modulů v podlaze vozidla. Bateriové moduly jsou umístěny v řadách po sedmi modulech, přičemž první řadu tvoří pouze tři moduly.



*Obrázek 35 Uspořádání modulů v podlaze vozidla*

#### 5.3.1 1. varianta

Kvůli přesnosti výsledků simulací byl zachován rozměr a uspořádání bateriových článků v modulu. Ovšem kvůli náročnosti sestavy byla geometrie modulu zjednodušena a navržena pro potřeby simulace (viz **Obrázek 36**).



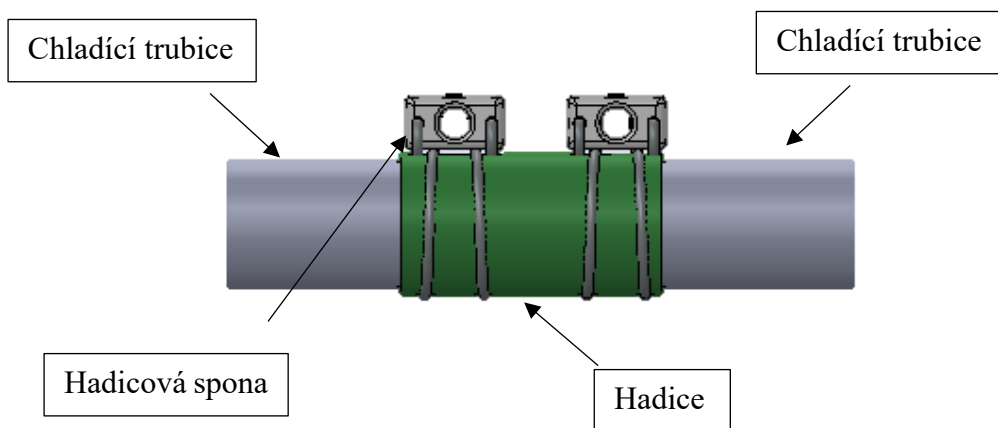
*Obrázek 36 Zjednodušený bateriový modul*

Celková simulace proudění byla rozdělena do tří okruhů tak, aby jednotlivé analýzy netrvaly příliš dlouho (viz **Obrázek 37**).



*Obrázek 37 Rozdělení na jednotlivé okruhy*

Pro reálné použití byla navržena spojnice ve formě hadice, která je připevněna hadicovou sponou mezi bateriovými moduly (viz **Obrázek 38**). Tento způsob spojení byl navržen, aby nedocházelo ke zkratu mezi moduly.



*Obrázek 38 Spojnice mezi bateriovými moduly*

Parametry, které byly nastavené v simulaci, vycházely ze **4. kapitoly** a z materiálových vlastností jednotlivých částí kapalinového chlazení (viz **Tabulka 12**).

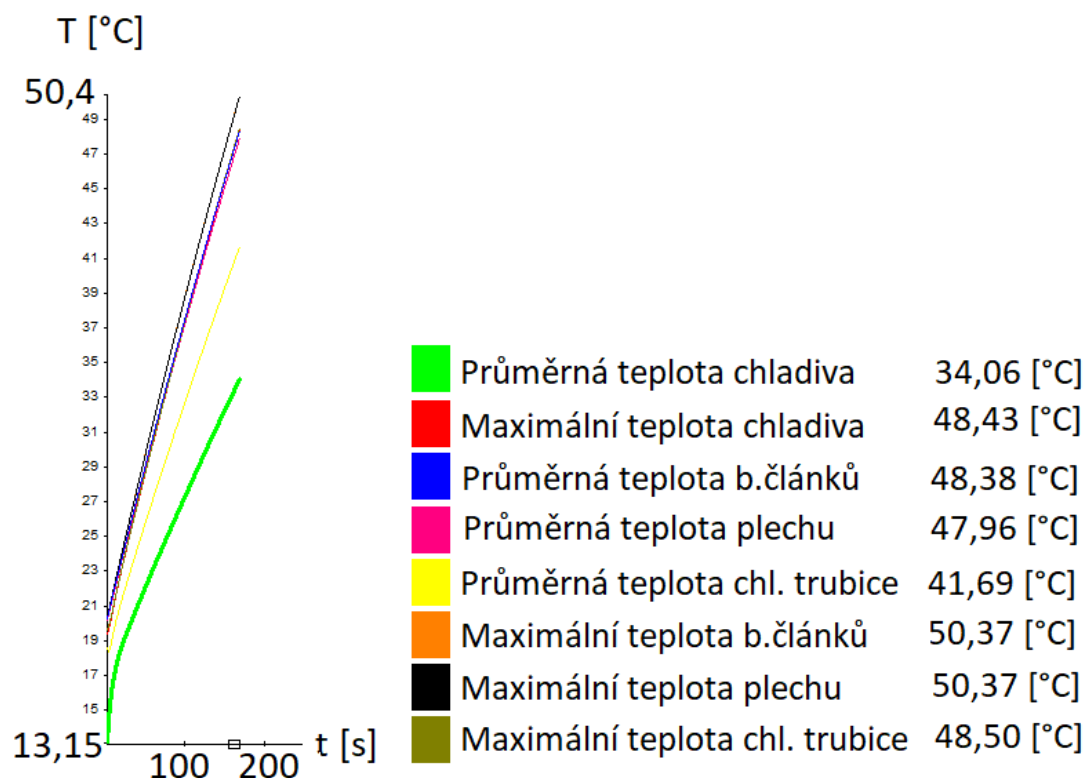
Vstupní rychlost chladicí kapaliny byla určena na základě čerpadel, která se používají v chladících okruzích automobilu. Hodnota byla nastavena na 10 l/min, jelikož tento průtok dokážou čerpadla udržet nepřetržitě a nejsou příliš hlučná.

Tabulka 12 Parametry použité při simulaci – 1. okruh

Komponent	Zvolený materiál	Okruhy	Vstupní rychlost	Vstupní teplota	Ztrátový výkon bateriového článku
Bateriový článek	Al 6061	1. okruh	10 l/min	12 °C	1,05 W
Pláštěv	Polykarbonát	2. okruh	10 l/min	-	1,05 W
Tvarovaný plech	Al 6061	3. okruh	10 l/min	-	1,05 W
Chladicí trubice	Al 6061				
Chladivo	Voda				

## 1. okruh

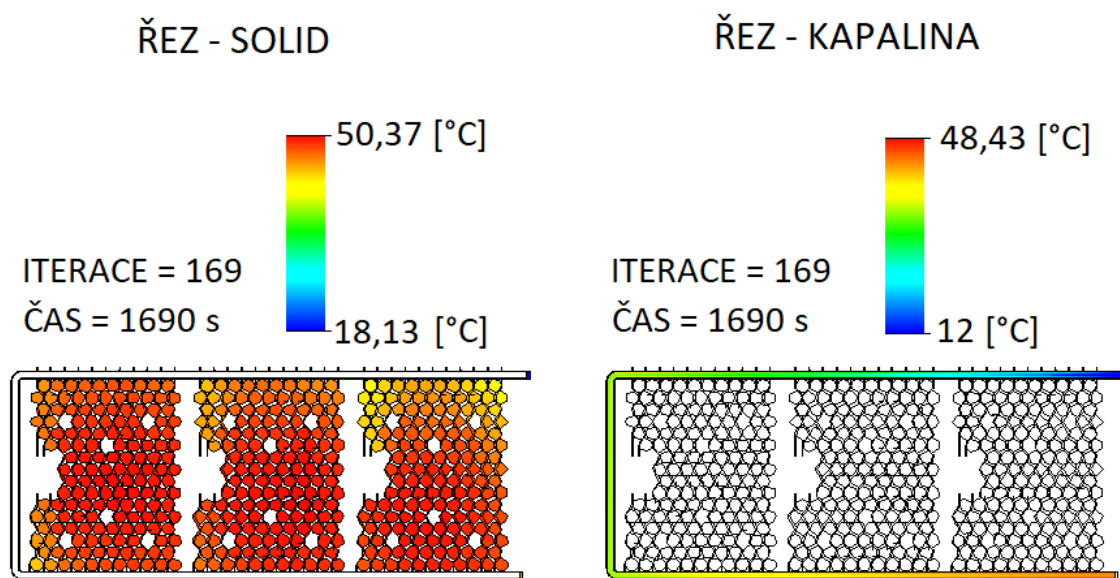
Graf, který je zobrazen níže (viz **Obrázek 39**), ukazuje průběh teploty jednotlivých komponentů bateriového modulu, které byly sledovány při simulaci. V prvním okruhu se ukázalo, že tato konfigurace nedokáže udržet bateriové články v bezpečném teplotním intervalu. Z grafu je patrné, že křivky nemají náznak ustáleného stavu, přičemž maximální teplota bateriových článků překročila hodnotu 50,37 °C.



Obrázek 39 Výsledky simulace návrhu (1. varianta)



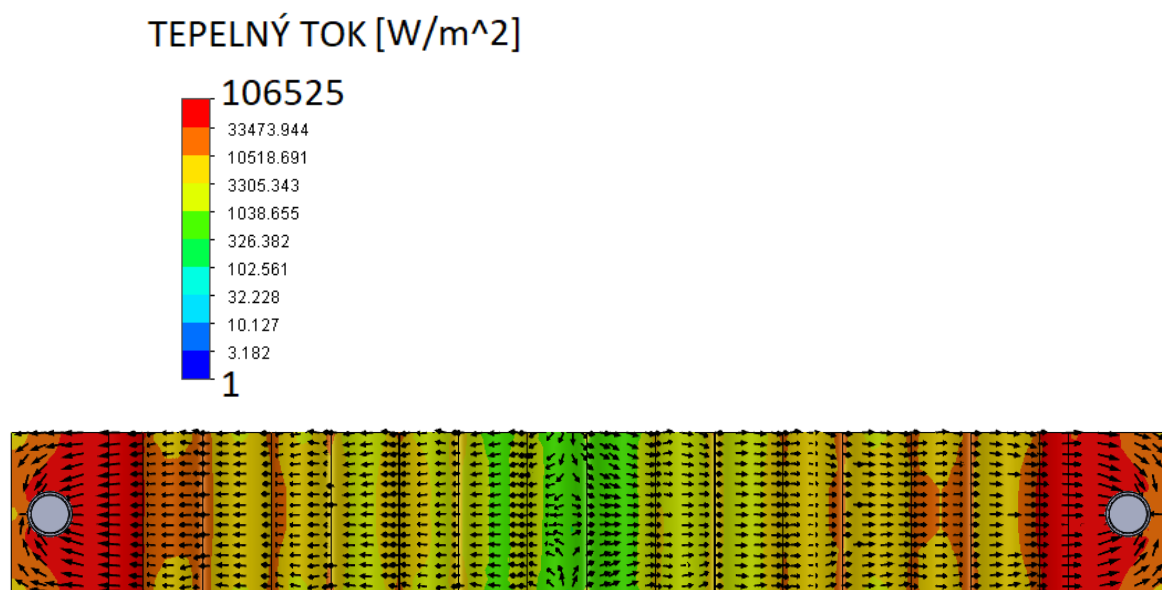
Řez simulace ukázal, že tato konfigurace nedokáže prostřednictvím tvarovaných plechů odvézt teplo bateriových článků v dostatečné míře. Největší problém měly bateriové články umístěné ve středu bateriového modulu, což znázorňuje škála barev (viz **Obrázek 40**).



*Obrázek 40 Řez simulace (1. varianta) - solid, kapalina*

U tohoto chladicího systému může být zlepšena efektivita zvýšením počtu chladících trubíc až na trojnásobek, jelikož tepelný tok (viz **Obrázek 41**) v simulaci ukázal, že se absorbované teplo iniciuje v místě chladící trubice. Dále také potvrzuje teorii sdílení tepla prostřednictvím kondukce, kde teplo prochází od teplejší stěny ke stěně s nižší teplotou (viz kapitola **3.1**). Další modifikací může být chladivo s nižší teplotou, zvýšení rychlosti proudění v chladící trubici nebo kombinace se vzduchovým chlazením.



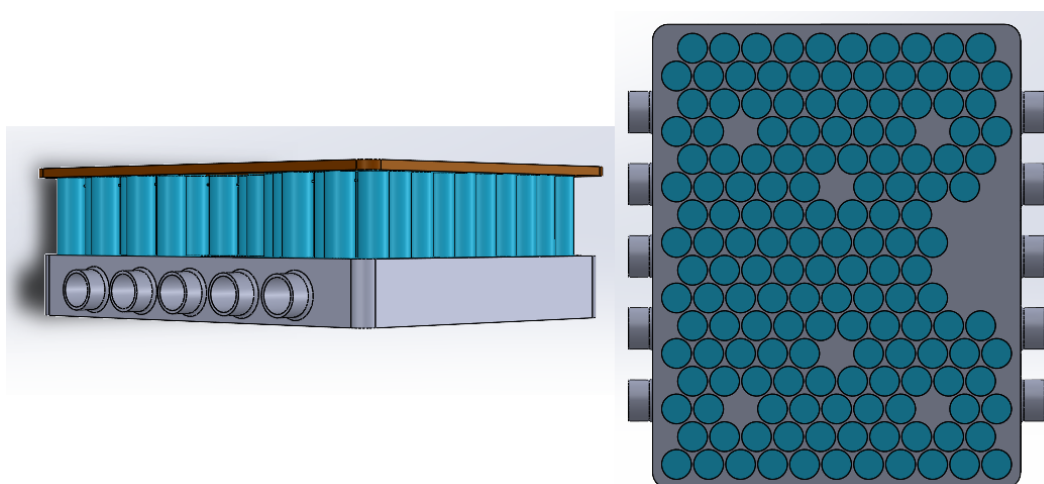


*Obrázek 41 Znáznornění tepelného toku - 1. varianta*

Jelikož návrh s tvarovaným plechem nedokázal bateriové články udržet v bezpečném teplotním intervalu, byl zde znázorněn pouze 1. okruh chladicího systému.

### 5.3.2 2. varianta

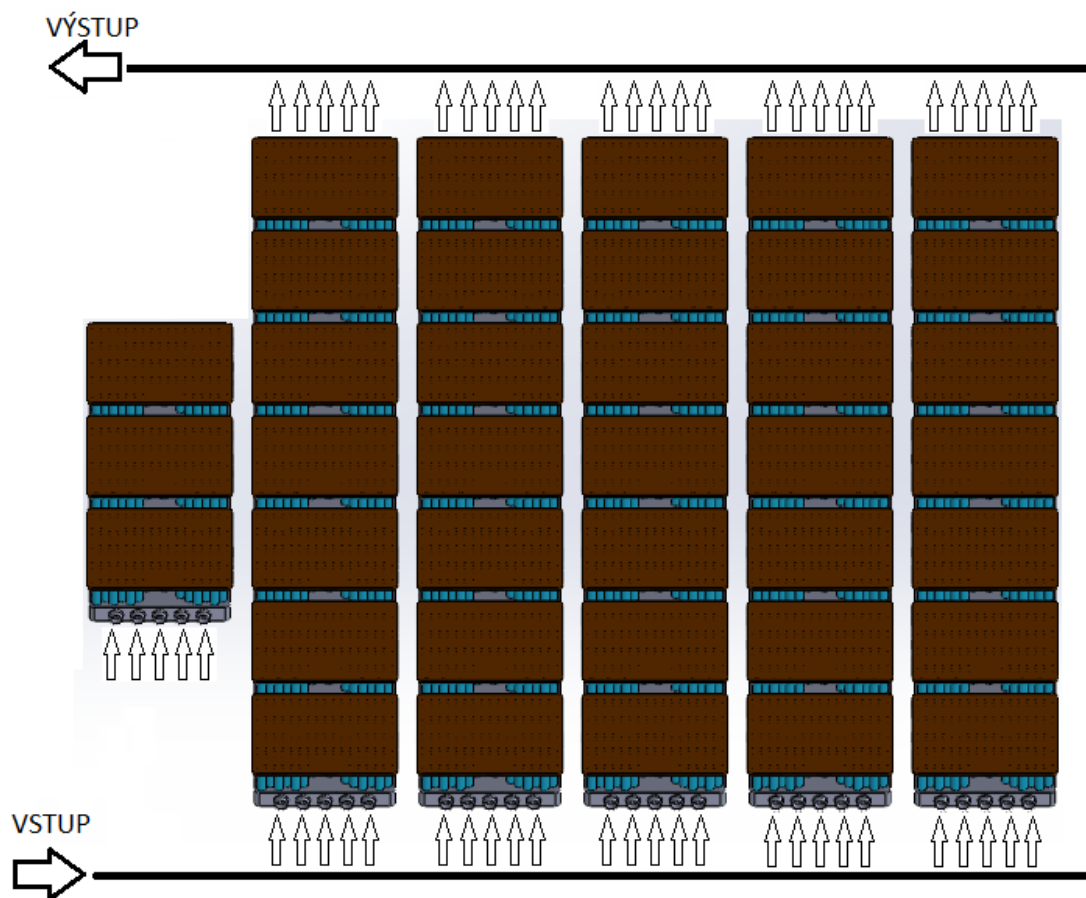
Bateriový modul rovněž odpovídá stejným rozměrům a uspořádání bateriových článků jako použité moduly v bateriovém boxu vozidla Titan. Pro potřeby simulace byla zjednodušena geometrie celého modulu (viz **Obrázek 42**).



*Obrázek 42 Zjednodušený bateriový modul - 2. varianta*

Při 2. variantě stačilo simulaci rozdělit na dva okruhy, jelikož 1. řada obsahuje 3 moduly a ostatní řady modulů 7. Vstupní parametry jsou pro všechny řady shodné. Chladivo proudí

skrz všechny chladicí desky, nikoliv kolem nich (viz **Obrázek 43**). Simulační proces se sedmi moduly se opakuje a výsledky byly stejné.



*Obrázek 43 Proudění chladiwa - 2. varianta*

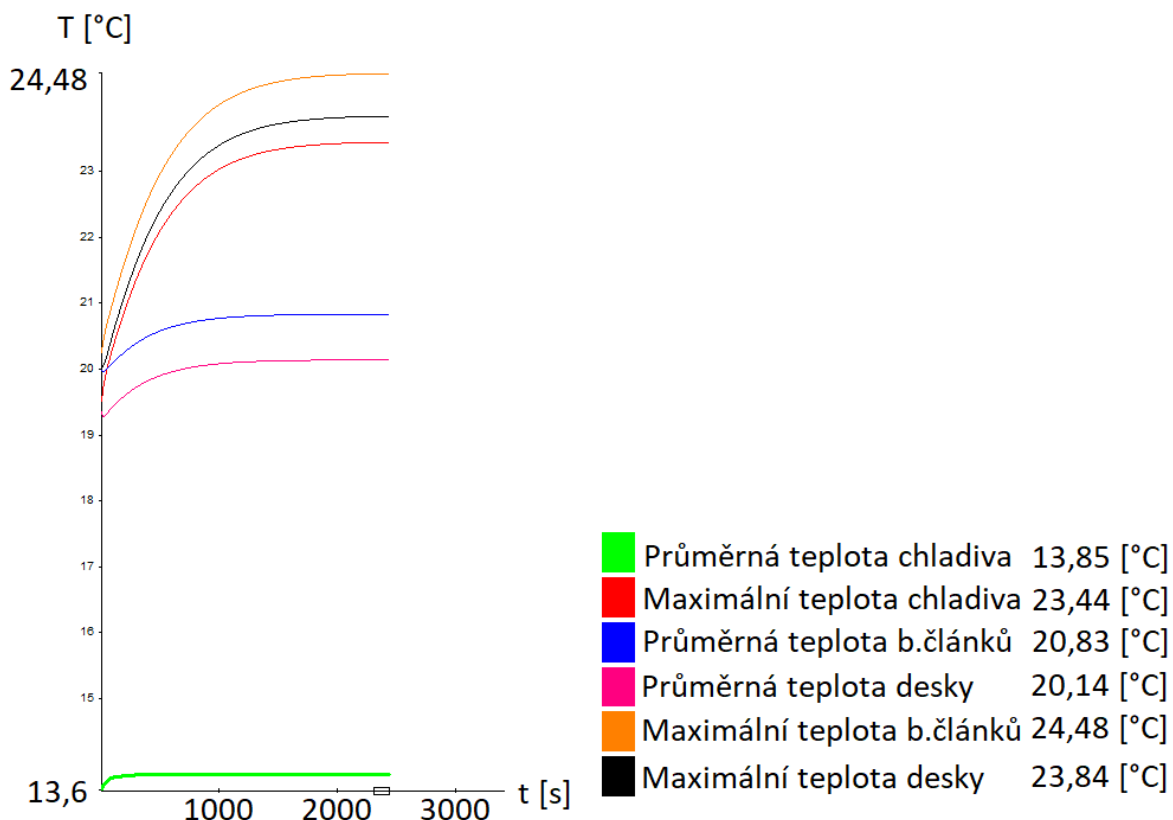
V níže uvedené tabulce jsou parametry druhé varianty použité při simulaci (viz **Tabulka 13**). Vstupní rychlost se u všech konstrukčních návrhů opakovala, jelikož vycházela z parametrů dostupných čerpadel. Vstupní teplota byla pro všechny okruhy stejná a ztrátový výkon byl nastaven na 1,05 W, což znamená 161 W na jeden modul.

*Tabulka 13 Parametry použité při simulaci - 2. okruh*

Komponent	Zvolený materiál	Okruhy	Vstupní rychlost	Vstupní teplota	Ztrátový výkon bateriového článku
Bateriový článek	Al 6061	1. okruh	10 l/min	12 °C	1,05 W
Pláštěv	Polykarbonát	2. okruh	10 l/min	12 °C	1,05 W
Chladicí deska	Al 6061				

## 1. okruh

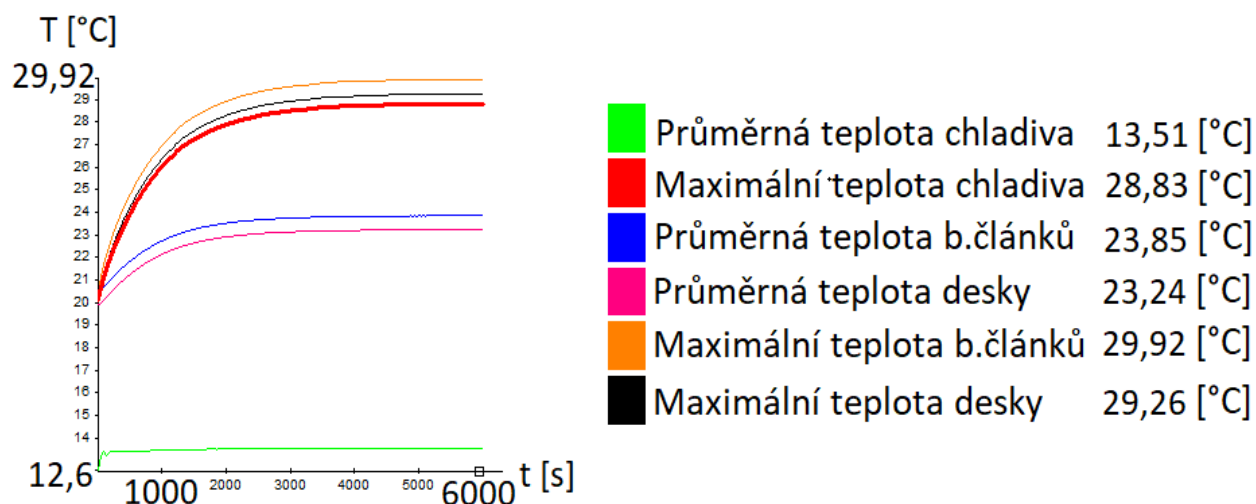
Barevné křivky značí průběhy teplot 1.okruhu, který se skládá ze tří modulů. Z grafu je patrné, že všechny komponenty, které byly sledovány jsou v ustáleném stavu. Nejdůležitější je maximální teplota bateriových článků, která při této konfiguraci dosáhla 24,48 °C, což je považováno za vyhovující. Další důležité hodnoty jsou uvedeny v legendě (viz **Obrázek 44**).



Obrázek 44 Výsledky simulace 1. okruh (2. varianta)

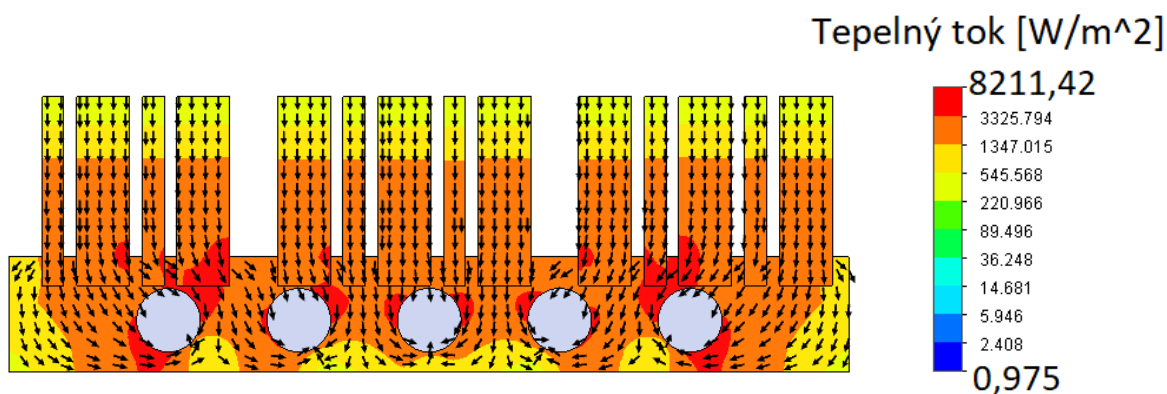
## 2. okruh

V druhém okruhu dosáhly bateriové články vyšších hodnot. Snížená efektivita byla způsobena vyšším počtem modulů. Maximální teplotu bateriových článků činila 29,92 °C, což je velice dobrá hodnota s ohledem na bezpečný teplotní interval 20-40 °C (viz **Obrázek 45**).



Obrázek 45 Výsledky simulace 2. okruhu (2. varianta)

Tepelný tok se při této konfiguraci inicioval do míst otvorů, kde proudí chladicí kapalina. Velkou výhodou tohoto systému je objem chladicí desky, který dokáže absorbovat velké množství tepla v kombinaci s materiálem, který má vysokou hodnotu měrné tepelné kapacity a koeficientu tepelné vodivosti (Al 6061). Absorbované teplo v simulaci odváděla voda, jakožto chladicí médium.



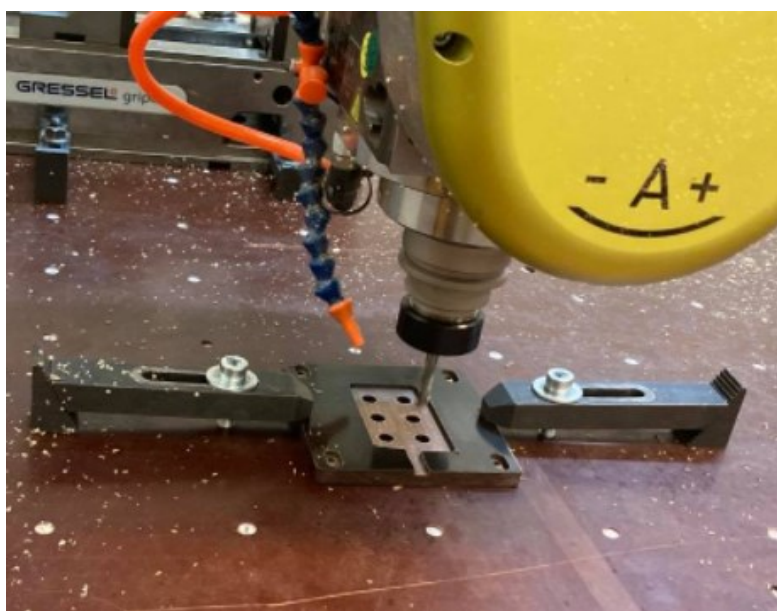
Obrázek 46 Znáznornění tepelného toku - 2. varianta

Objem chladicí desky nemá pouze pozitivní vliv na systém chlazení. Dnešní trendem automobilového průmyslu je eliminace hmotnosti a z tohoto důvodu je třeba v dalších krocích chladicí desku odlehčit nebo snížit její výšku. Tento návrh umožňuje pouze paralelní zapojení bateriových článků.

## 6 Experimentální část

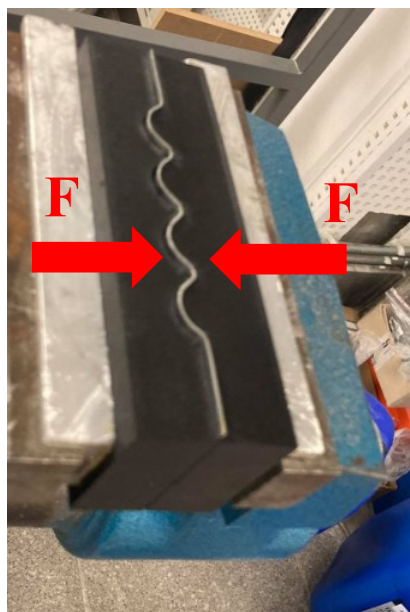
Experimentální část byla provedena v závislosti na návrh s tvarovaným plechem (viz **kapitola 5.1**). Cílem této části bylo vytvoření reálného modulu, u kterého bude možné porovnat výsledky ze simulace a zjistit efektivitu dané konfigurace.

Plástve bateriového modulu byly obrobeny z polotovaru na základě počítačem řízené výroby (CAD/CAM). Polotovaz byl upnut pomocí upínek a vytvořený program poté zajistil výrobu plástve do finální podoby (viz **Obrázek 47**).



*Obrázek 47 Výroba plástve modulu na CNC fríze*

Tvarované plechy byly vyrobeny prostřednictvím formy vytvořené na 3D tiskárně. V prvním kroce byly vytvořeny 3D modely, které představovaly razník a raznici. V druhém kroce byly nastříhány plechy o tloušťce 0,6 mm na požadovaný rozměr, který byl zjištěn z technického výkresu. Ve třetím kroce byl nastříhaný plech vložen mezi vytištěné modely a utažen ve stolním svěráku (viz **Obrázek 48**). Tento postup byl opakován pro požadovaný počet (10 ks).

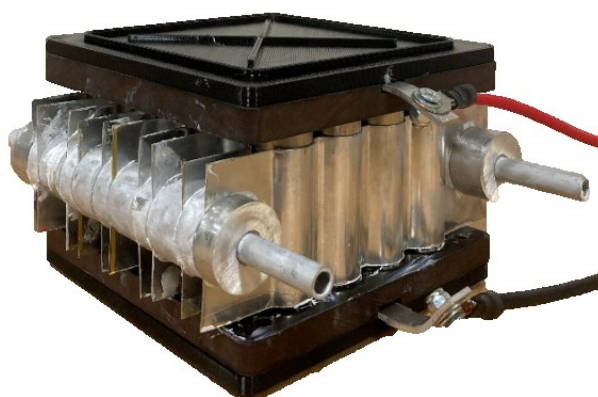


*Obrázek 48 Výroba tvarovaných plechů*

Bateriové články byly zbaveny ochranné fólie, jelikož bylo zapotřebí dosáhnout maximální styčné plochy pro odvod tepla mezi článkem a tvarovaným plechem. Pro dosažení vysoké míry efektivity byly tyto komponenty opatřeny vrstvou teplovodivé pasty.

Po usazení plástve byly články přibondovány pro vytvoření kladné a záporné elektrody. Ochranu pláství zajišťovala ABS deska, která byly vytištěna na 3D tiskárně a následně přilepena epoxidovým lepidlem (viz **Obrázek 49**).

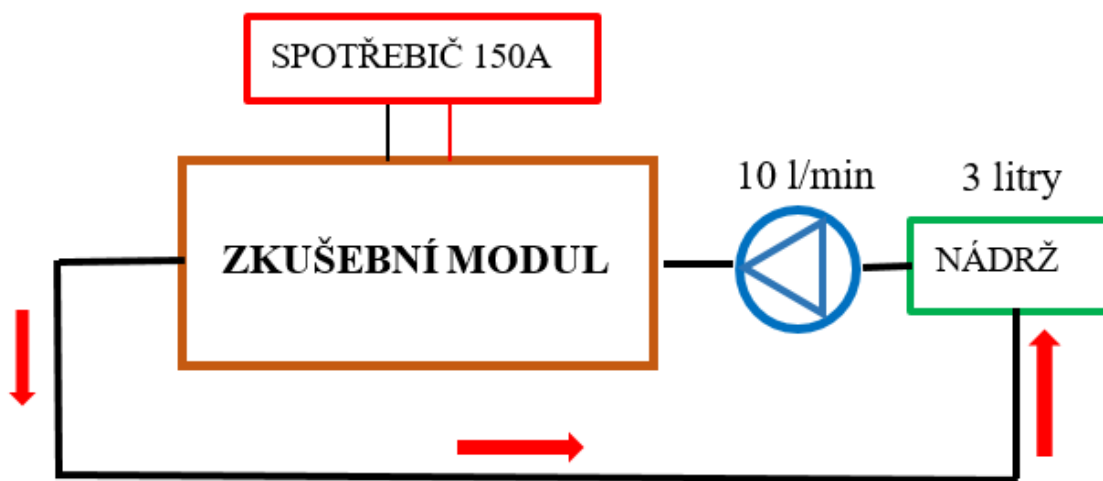
Na obrázku (viz **Obrázek 49**) je zobrazen hotový zkušební modul, který byl použit pro experiment.



*Obrázek 49 Pohled na vytvořený modul*

Oběh vody v chladicím systému obstarávalo čerpadlo společně se zásobníkem a průtok byl nastaven na 10l/min.

Bateriový modul byl připojen na měřicí stanici, která se skládá z relé a bočníku, který slouží k měření proudu. Komponenty jsou napojeny na odporové dráty ve vodní lázni, přičemž podle zapojení se mění odpor a tím i procházející proud podle Ohmova zákona. K měření teploty byly použity termočlánky (viz **Obrázek 50**).

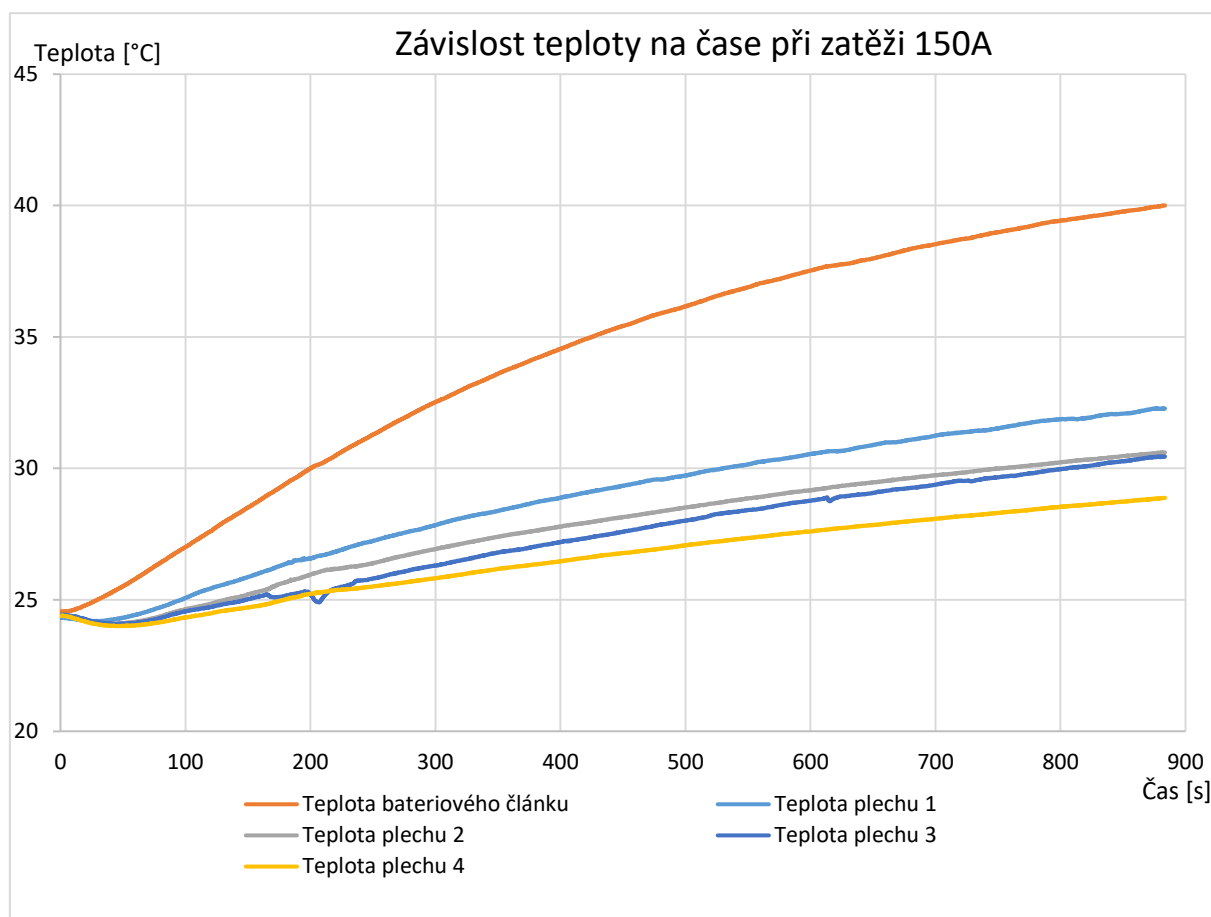


*Obrázek 50 Blokové schéma experimentu*

Veškerá výkresová dokumentace modulu, který byl použit pro fyzický experiment, je uvedena v příloze (viz **Příloha výkresové dokumentace**).

## 6.1 Vyhodnocení

Výstupem experimentálního měření bylo dosažení grafu (viz **Obrázek 51**). Z grafu na obrázku je patrné, že se logaritmický průběh blíží ustálenému stavu se zvyšující teplotou. Lze předpokládat, že při použití nižší teploty chladiva a výměníku tepla by křivka dosáhla ustálených hodnot v bezpečném teplotním intervalu (20-40 °C).

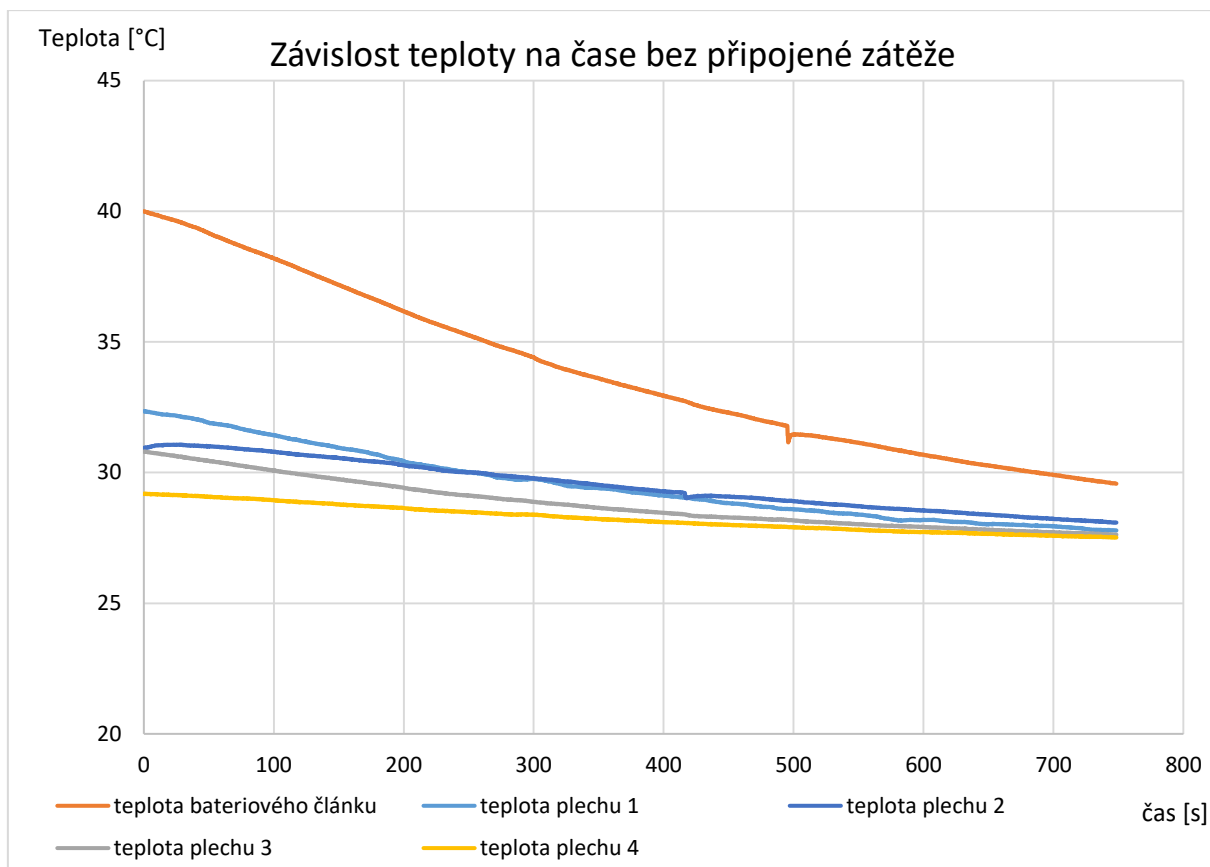


*Obrázek 51 Závislost teploty na čase při elektrickém proudu 150 [A]*

Při experimentu byly použity termočlánky, které měřily teplotu bateriových článků a tvarovaného plechu, který odváděl teplo. Jelikož byla použita teplovodivá pasta, termočlánky nechtěly přilnout k povrchu bateriového článku. Z tohoto důvodu byl nalepen pouze jeden termočlánek a při měření byly pak kontrolovány všechny ostatní články ruční metodou. Bateriové články měly minimální teplotní odchylku.

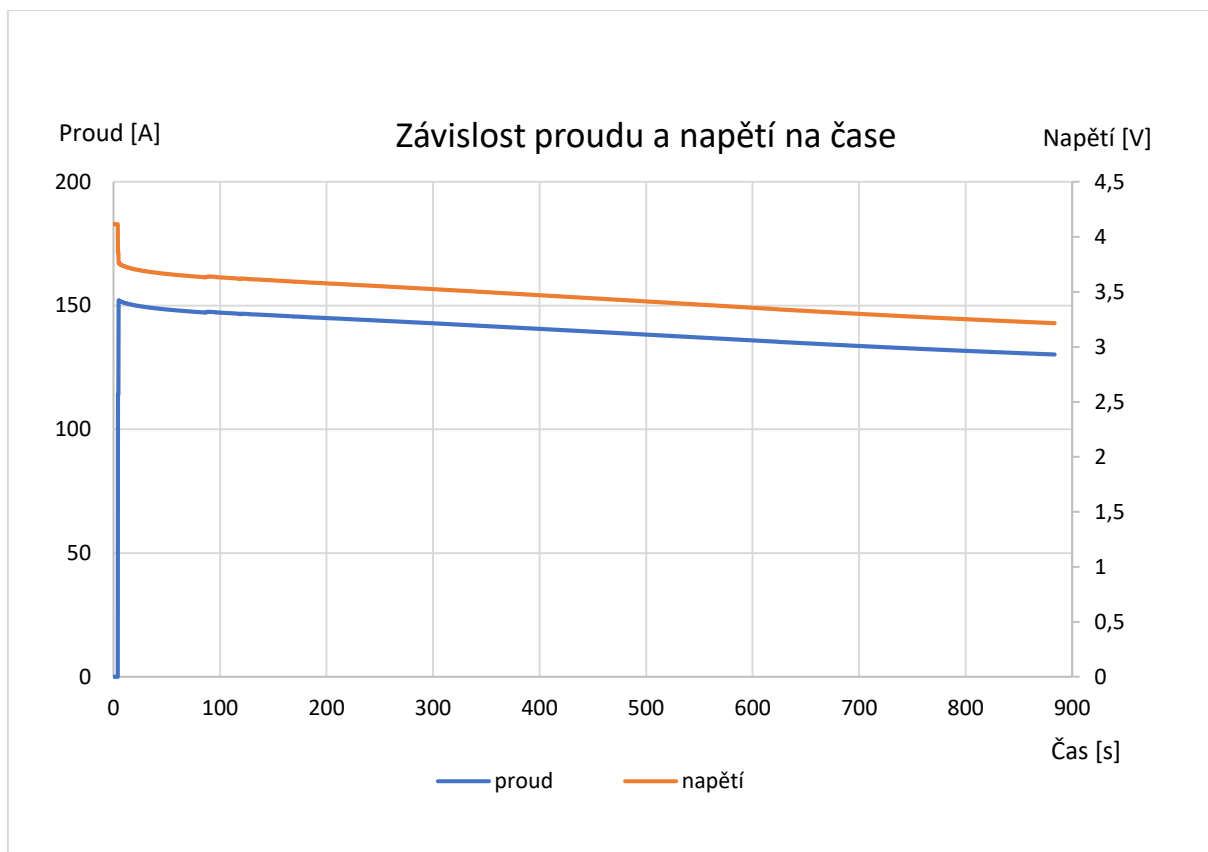
Graf na obrázku (viz **Obrázek 52**) navazuje na předešlý graf bez časové prodlevy. Po odpojení zátěže začla teplota ihned klesat, což znázorňují barevně označené křivky. Celkový čas experimentu činil 27 minut.





Obrázek 52 Závislost teploty na čase bez zátěže

Na začátku experimentu bylo napětí bateriových článků 4,16 V. Během vybíjení vlivem elektrického proudu 150 A, napětí skokově snížilo hodnotu na 3,85 V z původních 4,16 V. Vlivem klesající uložené energie v člancích, zmíněné napětí dále klesalo. Již zmíněný skokový pokles napětí byl zapříčiněn měkkým zdrojem (viz **Obrázek 53**).



*Obrázek 53 Závislost elektrického proudu a elektrického napětí na čase*

## 7 Závěrečné zhodnocení

V praktické části byly navrženy dvě varianty bateriových modulů. Jednalo se bateriový modul s tvarovaným plechem (viz **Obrázek 27**) a chladicí deskou (viz **Obrázek 30**).

Na základě provedených simulací provedených v prostředí SolidWorks byla zvolena jako vhodná 2. varianta, která zajistila udržení teploty v požadovaném teplotním intervalu (0 – 40 °C).

Výsledky 1. varianty naznačují, že při vyšším počtu chladících trubíc, bude chladicí systém dosahovat lepších výsledků v kombinaci s nižší teplotou chladiva. Jelikož je 1. varianta vhodná pro sérioparalelní zapojení, doporučují další vývoj.

Při experimentu, ve kterém byl použit bateriový modul s tvarovaným plechem, došlo k nárůstu teploty nad požadovaný interval, což může být způsobeno vyšší proudovou zátěží, která na rozdíl od matematického modelu činila 150 A. Při výpočtech v simulaci bylo použito pouze 100 A. Při dalších experimentech bych doporučoval změnit hodnotu elektrického proudu na základě testování v městském provozu. Dalším faktorem, který ovlivnil výsledky fyzického experimentu, byla vyšší teplota chladicí média, která nebyla ochlazována ve výměníku tepla. Proto doporučuji pro další experiment použití výměníku tepla, který byl navržen v mé diplomové práci. U fyzického experimentu nedocházelo k dokonalé styčné ploše mezi článkem a tvarovaným plechem a proto byla u fyzického experimentu použita teplovodivá pasta.

## Závěr

V teoretické části byly popsány vlastnosti bateriových článků a problematika elektromobilů, která popisuje rozvoj elektromobility a aktuální zlepšení lithium-iontových článků. Na základě informací bateriových článků byl vybrán konkrétní typ (LG M36 T). Vybrané bateriové články mají obстойné parametry, dobrou cenu a možnost dodání ve velkém množství.

Pro konstrukční návrh byla provedena rešerše chladících okruhů, které používají známé automobilky zabývající se elektromobilitou. Výsledky rešerše ukázaly, že systémy kapalinového chlazení jsou výkonnější nežli systémy vzduchové. Z hlediska míry degradace, vyšší účinnosti a nižší hlučnosti navrhuji přímé kapalinové chlazení, které také používá automobilka Tesla.

Pro výpočet výměníku tepla bylo vybráno chladící médium a vypočten ztrátový výkon. Hodnoty těchto veličin pak byly dosazeny v rovnicích tepelné bilance a prostupu tepla. Na základě získaných požadavků pro výměníky tepla, které se používají v okruhu kapalinového chlazení, byl vybrán vhodný deskový výměník.

V praktické části byly navrženy dvě varianty chlazení bateriových modulů, přičemž matematickému modelu vyhovovala pouze 2. varianta, která dokázala udržet bateriové články v bezpečném teplotním intervalu.

V rámci fyzického experimentu byl použit zjednodušený model bateriového modulu s použitím tvarovaných plechů z důvodu možnosti použití sérioparalelního zapojení bateriových článků.

Na závěr bylo provedeno hodnocení dosažených výsledků jednak ze simulací, ale také z fyzického experimentu na zkušebním modulu. Dále byl doporučen další postup pro další vývoj kapalinového chlazení a dalších experimentálních měření.

## Seznam použité literatury

- [1] Summary Of Electric Vehicle Battery Cooling Systems. Jingweizhu weebly [online]. jingweizhu.weebly.com, 2015 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://jingweizhu.weebly.com/blog/summary-of-electric-vehicle-battery-cooling-systems>
- [2] *Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu: Elektro* [online]. Brno: Ladislav Němec, 2016 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/108964184-Lithiove-trakcni-akumulatory-pro-elektromobilitu.html>
- [3] HROMÁDKO, Jan. Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada Publishing, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1
- [4] 12. KAPITOLA-TEPELNÉ VLASTNOSTI [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2012 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: file:///C:/Users/Dell/Downloads/KZM\_12.pdf
- [5] NOŽIČKA, Jiří. Mechanika tekutin. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2865-8.
- [6] KUPPAN, T. *Heat exchanger design handbook*. Second edition. Boca Raton, [2013]. Mechanical engineering. ISBN 978-1-4398-4213-3.
- [7] PRODUCT SPECIFICATION: Rechargeable Lithium Ion Battery Model: INR18650 M36T 12.50Wh. In: ročník 2017, číslo 1.
- [8] Jiling, Li a Zhen, Zhu. Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles. Göteborg: 2014. 1652-8557.
- [9] Tesla Thermal Management System-explanation. *Tesla motors club: Thermal management system* [online]. Estonia: Arnis, 13.4. 2015n. 1., 2015 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://teslamotorsclub.com/tmc/threads/tesla-thermal-management-system-explanation.88055/>
- [10] Tesla battery predicted to have 80% capacity after 840,000 km: Tesla Model S/X Mileage vs Remaining Battery Capacity. *Teslarati* [online]. 4.9. 2017 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.teslarati.com/tesla-battery-life-80-percent-capacity-840km-1-million-km/>
- [11] *Library – By Vehicle: Vehicle and testing results* [online]. 2017 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://avt.inl.gov/content/pubs-vehicles>

- [12] HEJZLAR, Radko. Sdílení tepla. Vyd. 4. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2974-3.
- [13] FUKÁTKO, Tomáš a Jaroslav FUKÁTKO. *Teplota a chlazení v elektronice II*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0199-3.
- [14] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. Brno: Cerm, 2001. 149 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [15] Pesaran, Ahmad. (2001). Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions
- [16] Jiling, Li a Zhen, Zhu. Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles. Göteborg: 2014. 1652-8557.
- [17] *Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and: DESIGNING BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS* [online]. 5.6. 2001, [cit. 2021-01-11]. Dostupné:  
[https://www.researchgate.net/publication/237250969\\_Battery\\_Thermal\\_Management\\_in\\_EVs\\_and\\_HEVs\\_Issues\\_and\\_Solutions](https://www.researchgate.net/publication/237250969_Battery_Thermal_Management_in_EVs_and_HEVs_Issues_and_Solutions)
- [18] DynSAN. *Hybrid Vehicle Powerplant Cooling*. [Online] [cit. 2018-05-05]  
<http://www.dynsan.com/gpage2.html>
- [19] Online výpočet [za 3 minuty] - Výměníky tepla SWEP [online]. Ostrava: VZH Ostrava, 2003 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.vymeniky-tepla.cz/vypocet/>
- [20] SZÉKYOVÁ, Marta, Karol FERSTL a Richard NOVÝ. *Větrání a klimatizace*. Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 80-8076-037-3.
- [21] RUBINA, Aleš. *Vzduchotechnika: Chlazení pro klimatizaci*. (přednáška) Vysoké učení technické: Fakulta stavební, 2013.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Závislost výkonu na teplotě u bateriových článků .....	9
Obrázek 2 Cylindrický lithium-iontový článek, převzato [3].....	10
Obrázek 3 Lithiový článek LG M36 T, převzato [7].....	12
Obrázek 4 Degradace baterií vozidel Tesla S a Tesla X, převzato [10] .....	12
Obrázek 5 Kompresorový chladicí okruh, převzato [21] .....	14
Obrázek 6 Zjednodušené schéma pasivního chlazení vzduchem, převzato [17].....	16
Obrázek 7 Zjednodušené schéma aktivního chlazení vzduchem, převzato [17] .....	16
Obrázek 8 Horizontální rozložení baterie, převzato [15] .....	17
Obrázek 9 Podélné rozložení baterie, převzato [15].....	17
Obrázek 10 Schéma pasivního kapalinového chlazení, převzato [16] .....	18
Obrázek 11 Schéma aktivního kapalinového chlazení, převzato [16].....	19
Obrázek 12 Chlazení v průřezu – Tesla, převzato [2] .....	19
Obrázek 13 Schéma chlazení přímou expanzí, převzato [16] .....	20
Obrázek 14 Schéma PCM chlazení, převzato [17].....	21
Obrázek 15 Graf chlazení olejem, převzato [17] .....	22
Obrázek 16 Graf chlazení vzduchem, převzato [17] .....	23
Obrázek 17 Teplotní spád tepelného toku jednoduchou stěnou, převzato [12].....	24
Obrázek 18 Energetická bilance, převzato [14].....	25
Obrázek 19 Příklad sdílení tepla prouděním, převzato [14] .....	25
Obrázek 20 Přenos tepla zářením, převzato [14].....	26
Obrázek 21 Rekuperační výměník, převzato [6] .....	30
Obrázek 22 Deskový výměník, převzato [6] .....	31
Obrázek 23 Srovnání měrné tepelné kapacity vody a 50% koncentráту, převzato [5].	31
Obrázek 24 Ztrátový výkon aplikován na bateriový box .....	33
Obrázek 25 Výstupní hodnota chladicí kapaliny .....	34
Obrázek 26 Výměník tepla SWEP V80H.....	36
Obrázek 27 Bateriový modul s tvarovaným plechem v rozloženém pohledu .....	38
Obrázek 28 Řez simulace s tvarovaným plechem - solid, kapalina .....	39
Obrázek 29 Výsledky simulace návrhu s tvarovaným plechem.....	40
Obrázek 30 Bateriový modul s chladicí deskou .....	41
Obrázek 31 Řez simulace s chladicí deskou - solid, kapalina .....	42
Obrázek 32 Výsledky simulace návrhu s chladicí deskou.....	43

Obrázek 33 Válcové pouzdro se závitem .....	43
Obrázek 34 Bateriový modul s chladicí deskou a pouzdry .....	44
Obrázek 35 Uspořádání modulů v podlaze vozidla .....	45
Obrázek 36 Zjednodušený bateriový modul .....	45
Obrázek 37 Rozdělení na jednotlivé okruhy .....	46
Obrázek 38 Spojnice mezi bateriovými moduly .....	46
Obrázek 39 Výsledky simulace návrhu (1. varianta).....	47
Obrázek 40 Řez simulace (1. varianta) - solid, kapalina .....	48
Obrázek 41 Znázornění tepelného toku - 1. varianta.....	49
Obrázek 42 Zjednodušený bateriový modul - 2. varianta.....	49
Obrázek 43 Proudění chladiwa - 2. varianta.....	50
Obrázek 44 Výsledky simulace 1. okruhu (2. varianta) .....	51
Obrázek 45 Výsledky simulace 2. okruhu (2. varianta) .....	52
Obrázek 46 Znázornění tepelného toku - 2. varianta.....	52
Obrázek 47 Výroba plástve modulu na CNC fréze .....	53
Obrázek 48 Výroba tvarovaných plechů .....	54
Obrázek 49 Pohled na vytvořený modul .....	54
Obrázek 50 Blokové schéma experimentu .....	55
Obrázek 51 Závislost teploty na čase při elektrickém proudu 150 [A] .....	56
Obrázek 52 Závislost teploty na čase bez zátěže.....	57
Obrázek 53 Závislost elektrického proudu a elektrického napětí na čase .....	58



## Seznam tabulek

Tabulka 1 Požadavky bateriových článků pro EV, převzato [3] .....	10
Tabulka 2 Výhody a nevýhody lithiových článků, převzato [3] .....	10
Tabulka 3 Srovnání bateriových článků .....	11
Tabulka 4 Legenda názvů chlazení.....	13
Tabulka 5 Hodnocení degradace, převzato [11] .....	13
Tabulka 6 Degradace bateriových článků u jednotlivých vozidel, převzato [11] .....	13
Tabulka 7 Teplotní materiálové vlastnosti, převzato [4] .....	29
Tabulka 8 Vstupní parametry pro rovnici tepelné bilance.....	34
Tabulka 9 Vstupní parametry pro rovnici prostupu tepla .....	35
Tabulka 10 Parametry simulace modulu s tvarovaným plechem .....	38
Tabulka 11 Parametry simulace modulu s chladičí deskou .....	41
Tabulka 12 Parametry použité při simulaci – 1. okruh.....	47
Tabulka 13 Parametry použité při simulaci - 2. okruh .....	50

## **Příloha výkresové dokumentace**

<u>Jméno součásti</u>	<u>Číslo výkresu</u>
vykres_sestava	dp-01-00
horni_plastev	dp-01-01
spojnice	dp-01-02
tvarovany_plech	dp-01-03
trubice	dp-01-04